
Experimentelle Einflussgrößenanalyse der Partikelemission von Pkw-Scheibenbremsen

Vom Fachbereich Maschinenbau an der
Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Hartmut Niemann, M.Sc.
aus Darmstadt

Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer

Tag der Einreichung: 18.05.2021
Tag der mündlichen Prüfung: 06.07.2021

Darmstadt 2021

D 17

Dieses Dokument wird bereitgestellt von TUpriints – Publikationsservice der TU Darmstadt.

<https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/>

Bitte verweisen Sie auf:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-192090

URI: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/19209>

Lizenz: CC BY-NC-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc.sa/4.0/>

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt. Die Inhalte dieser Dissertation resultieren aus einem Forschungsprojekt, das in Zusammenarbeit mit der Daimler AG und dem Institut für Energie- und Umwelttechnik (IUTA e.V.) durchgeführt wurde.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner für die wissenschaftliche Ausbildung in den vergangenen vier Jahren und das enge Betreuungsverhältnis. Seine Anregungen sowie die stets konstruktive, zielführende Kritik haben wesentlich zur vorliegenden Arbeit beigetragen und einen kontinuierlichen fachlichen, aber auch persönlichen Lernprozess angeregt, den ich in hohem Maße zu schätzen weiß.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer vom Institut für Dynamik und Schwingungen (IDS) der Technischen Universität Braunschweig danke ich für die Übernahme des Koreferats sowie für seine wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die an mehreren Stellen der Arbeit Ausgangspunkt für neue Fragestellungen und Erklärungsansätze waren.

Für die Möglichkeit zur Bearbeitung des interessanten Forschungsprojektes und die sehr konstruktive Zusammenarbeit bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Georg Frentz und Frau Anna Benkowitsch von der Daimler AG.

Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Heinz Kaminski vom Institut für Energie- und Umwelttechnik (IUTA). Die sorgfältige messtechnische Unterstützung, die kritischen wissenschaftlichen Diskussionen und die angenehme Zusammenarbeit während der gemeinsamen Versuchsreihen waren eine große fachliche und menschliche Bereicherung. Herrn Dr.-Ing. Christof Asbach vom IUTA danke ich für seine konstruktive und oftmals sehr kurzfristigen Rückmeldungen zu gemeinsamen Veröffentlichungen sowie für die ebenfalls menschlich sehr angenehme Zusammenarbeit.

Allen Mitarbeitern der Link Europe GmbH danke ich für die Unterstützung, die große Hilfsbereitschaft sowie für die sehr gute, konstruktive Arbeitsatmosphäre während der Versuchsreihen. Zudem möchte ich mich bei ihnen für die oftmals kurzfristige Realisierung individueller Versuchsvorhaben bedanken.

Meinen Kollegen am Fachgebiet Fahrzeugtechnik danke ich für das angenehme Arbeitsklima, ihre Unterstützung und für den fachlichen Austausch. Den Mitarbeitern in der Werkstatt und insbesondere den Werkstattleitern Herrn Robert Korndörfer und Herrn Max Schumacher danke ich für die gewissenhafte Unterstützung bei der Planung und Fertigung von Versuchsaufbauten. Zudem gilt mein Dank den studentischen Abschlussarbeitern und Mitarbeitern, deren Arbeit zum Gelingen des Projektes beigetragen hat. Insbesondere sei hier Herr Alexander Blödel erwähnt, der den Versuchsaufbau zur Belagrückstellung entwickelt hat.

Meiner Mutter Annette Niemann und meinem zu früh verstorbenen Vater Bernhard Niemann danke ich für ihre sehr liebevolle Unterstützung und alle Werte, die sie mir auf den Weg gegeben haben und die mich prägen. Zudem danke ich ihnen dafür, dass sie mir die Ausbildung ermöglicht haben.

Meiner Freundin Michaela Röser danke ich für die Kraft, die sie mir während des gesamten Studiums, in gemeinsamen Prüfungsphasen und während des Verfassens meiner Dissertation gegeben hat. Die gegenseitige persönliche Unterstützung in allen Lebenslagen und die Möglichkeit zum Austausch und zu Diskussionen sind eine große persönliche Bereicherung für mich.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungen.....	VI
Formelzeichen und Indizes	VII
Abbildungen und Tabellen.....	X
Kurzzusammenfassung	16
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Forschungsmethodik und Struktur der Arbeit	2
2 Stand der Technik auf dem Gebiet der Aerosolmessprinzipien.....	4
2.1 Impaktor	5
2.2 Gravimetrie.....	6
2.3 Streulichtmessung'	7
2.4 Kondensationspartikelzählung	9
2.5 Elektrische Mobilität	9
3 Stand der Forschung auf dem Gebiet der Bremspartikelemissionen	10
3.1 Betriebsgrößen der Bremse	10
3.1.1 Bremsscheibentemperatur	10
3.1.2 Bremsgeschwindigkeit und -druck	14
3.1.3 Rollgeschwindigkeit und Off-Brake-Emission.....	16
3.1.4 Reibhistorie und Tribologie der Bremse	19
3.2 Emissionsmodelle.....	22
3.3 Fazit zum Stand der Forschung	23
4 Untersuchungsmethodik	27
4.1 Definition der Messgrößen.....	27
4.2 Versuchsaufbau.....	29
4.3 Versuchsmethodik	30
4.3.1 Bremsscheibentemperatur.....	30
4.3.2 Betriebshistorie	33
4.3.3 Bremsdruck und -geschwindigkeit	36

4.3.4	Einflussgrößen bei nicht betätigter Bremse.....	38
5	Systemidentifikation des Versuchsaufbaus	40
6	Effekt der Betriebsgrößen auf das Emissionsverhalten.....	43
6.1	Scheibentemperatur	43
6.1.1	Temperatureffekt auf die Partikelanzahlemission	43
6.1.2	Temperatureffekt auf PM_{10} -Emissionen	47
6.1.3	Zwischenfazit Scheibentemperatur	54
6.2	Reibhistorie.....	57
6.2.1	Ergebnisse der vollfaktoriellen Variation	57
6.2.2	Ergebnisse der Einzelvariation	61
6.2.3	Diskussion und Zwischenfazit.....	65
6.3	Bremsdruck und -geschwindigkeit	68
6.3.1	Massenkonzentration.....	68
6.3.2	Anzahlkonzentration	71
6.3.3	Größenverteilung.....	73
6.3.4	Diskussion und Zwischenfazit.....	77
6.4	Emission bei nicht betätigter Bremse	80
7	Konstruktive Einflussgrößen auf das Emissionsverhalten	82
7.1	Belagrückstellung	82
7.1.1	Ergebnisse Belagrückstellung	82
7.1.2	Diskussion Belagrückstellung	91
7.1.3	Zwischenfazit Belagrückstellung	94
7.2	Exemplarische Variation der Reibpaarungen.....	95
7.2.1	Ergebnisse Reibpaarungen	95
7.2.2	Diskussion Reibpaarungen	97
8	Kennfeldbasierte Vorhersage von Bremspartikelemissionen	103
8.1	Modellbildung.....	103
8.2	Simulationsergebnisse	104
8.3	Diskussion.....	107
9	Zusammenfassung und Ausblick	111
A	Anhang	114
A.1	Methodik zur Berechnung der Anzahlemission pro Bremsung	114
A.2	Methodik zur Systemidentifikation des Versuchsaufbaus	114
A.3	Variation von harmonischer Druck- und Geschwindigkeitsamplitude	116
A.4	Temperatureinfluss auf PM_{10} in Abhängigkeit der Geschwindigkeit.....	117
A.5	Druckluftversuch bzgl. Reservoirmodell.....	118
A.6	Mittlere Scheibentemperatur mit und ohne Belagrückstellung	119

Literaturverzeichnis	120
Eigene Veröffentlichungen	127
Betreute studentische Arbeiten.....	128

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
ABS	Anti-Blockier-System
APS	Aerodynamic Particle Sizer
AP	Arbeitspunkt
CCD	Ceramic Coated Disc
CFD	Computational Fluid Dynamics
CPC	Condensation Particle Counter
ECE	Economic Commission for Europe
ELPI	Electrical Low Pressure Impactor
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	Fast Fourier Transformation
FMPS	Fast Mobility Particle Sizer
GG	Grauguss
HEPA	High Efficiency Particulate Air filter
IUTA	Institut für Energie- und Umwelttechnik
NAO	Non-Asbestos-Organic
OFAT	Einzelvariation (One Factor At a Time)
OPS	Optical Particle Sizer
Pkw	Personenkraftwagen
PM_{10}	Verbleibende luftgetragene Partikelmasse nach Abscheidung mit einer Trennkurve, die 50 % Abscheidegrad bei einem aerodynamischen Durchmesser von 10 μm aufweist
PMP	Particle Measurement Program
PT1	Verzögerungsglied
Ref	Referenz
RS	Rückstellung
TSI	Thermo-Systems Engineering Co. (Firmenname)
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
WC	Wolfram Carbid
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure

Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	m s^{-2}	Beschleunigung
b	m	Breite
C	-	Cunningham-Faktor
d	m	Durchmesser
E	-	Impaktordurchlassrate
f	Hz	Frequenz
F	N	Kraft
H	N m^{-2}	Härte
i	-	Laufvariable
I	W m^{-2}	Bestrahlungsintensität
k	-	Verschleiß- bzw. Partikelkoeffizient
ℓ	m	Länge
m	g	Emittierte Masse
M	g m^{-3}	Massenkonzentration
n	-	(Partikel-) Anzahl
N	cm^{-3}	(Partikel-) Anzahlkonzentration
p	bar	Bremsdruck
P	W	Leistung
Q	-	Streulichtkoeffizient
r	m	Radius bzw. radialer Abstand
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
s	m	Strecke
St	-	Stokes-Zahl
t	s	Zeit
T	°C	Temperatur
v	km h^{-1}	Geschwindigkeit
V	m^3	Volumen
W	J	Arbeit

Symbol	Einheit	Beschreibung
α	-	Partikelgrößenparameter
Δ	-	Differenz
η	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	Dynamische Viskosität
θ	Nm	Drehmoment
κ	g	Mittlere Partikelmasse
λ	m	Elektromagnetische Wellenlänge
ρ	g cm^{-3}	Dichte
μ	-	Reibwert
ϑ	-	Brechungsindex
φ	°	Winkel
ϕ	-	Kumulative Dichtefunktion / Empirische Summenhäufigkeitsfunktion
τ	s	Zeitkonstante

Index	Beschreibung
0	Ausgangszustand
Adap	Adaption
ae	aerodynamisch
akt	Aktuelle Bremsung
B	Bremsung
Bel	Belag
Beu	Beugung
Br	Brechung
char	charakteristisch
Cunn	Cunningham
E	Emission
El M	Elektrische Mobilität
Fl	Fluid
grav	gravimetrisch
N	Normal
kum	kumulativ
krit	kritisch
LS	Luftspalt
p	Bremsdruck
P	Partikel
R	Reservoir
Ref	Reflektion
S	Scheibe
opt	Optische Streulichtmessung
v	Geschwindigkeit
Ver	Verschleiß
Vol,äq	Volumenäquivalent
vorg	Vorgängerbremsung
σ	Standardabweichung
γ	Schiefte einer Verteilung
Symbol	Operator
\bar{x}	Mittelwert
\tilde{x}	Perzentil

Abbildungen und Tabellen

Abbildung 1: Struktur der Arbeit und übergeordnete Forschungsfragen	3
Abbildung 2: Grafische Übersicht über die im vorliegenden Kapitel beschriebenen Messprinzipien, ihre Ausgangsgrößen und exemplarische Messbereiche: 2.1 Größenklassifizierung mittels Impaktorprinzip, 2.2 Ermittlung der Partikelmasse mittels Gravimetrie, 2.3 Streulichtmessung der Anzahlgrößenverteilung feiner und grober Partikel, 2.4 Bestimmung der Partikelanzahl mittels Kondensationspartikelzählung, 2.5 Ermittlung der Anzahlgrößenverteilung ultrafeiner und feiner Partikel mittels elektrischer Klassifizierung	5
Abbildung 3: Struktur des vorliegenden Kapitels bezüglich des aktuellen Forschungsstandes von Einflussgrößen auf die Partikelemission von Scheibenbremsen.....	10
Abbildung 5: Visualisierung der Messdaten von Farwick zum Hagen. Die durchgezogenen Linien sind gemessene Datenpunkte, die der Publikation entnommen sind und die gestrichelten Linien stellen hypothetische funktionale Beziehungen zwischen APS-Anzahlkonzentration und Geschwindigkeit dar	18
Abbildung 6: Darstellung der Reibwertanpassung auf Grundlage der Daten von Ostermeyer und Wilkening ⁷¹ in einem Versuch mit drei Geschwindigkeitsblöcken bei Reibgeschwindigkeiten von 80 km/h, 30 km/h und 80 km/h.....	20
Abbildung 7: Links: Übersicht über den Stand der Forschung bezüglich der Einflussgrößen Temperatur T , Druck p , Geschwindigkeit v und Reibhistorie auf die Emission von Partikelmasse m und anzahl n . Rechts: Forschungsbedarf in Form von Forschungsfragen	25
Abbildung 8: Links: Übersicht über den Stand der Forschung bezüglich Emissionsmodellen für die Vorhersage von Bremspartikelemissionen. Rechts: Forschungsbedarf für die Vorhersage von Bremspartikelemissionen in Form von bisher unbeantworteten Forschungsfragen	26
Abbildung 9: Experimenteller Versuchsaufbau zur Vermessung der Feinstaubemissionen einer Pkw-Betriebsbremse mittels eines Schwungmassenprüfstandes	30
Abbildung 10: Mehrstufige Temperaturdreiecke zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit des gemessenen Temperatureinflusses unterhalb der kritischen Temperatur.	33
Abbildung 11: Vollfaktorieller Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses der Reibhistorie	35
Abbildung 12: Einzelfaktorieller Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses der Reibhsitorie	36
Abbildung 13: Versuchsplan zur Vermessung des Druck- und Geschwindigkeitseinflusses, bestehend aus 25 Arbeitspunkten, die auf Linien konstanter Reibleistung gruppiert sind.	38
Abbildung 14: Versuchsaufbau zur Belagrückstellung und zur Einstellung der Luftspaltbreite. Pro Belag üben zwei Federn Rückstellkräfte auf die Rückenplatten aus, um die Beläge nach dem Lösen des Bremsdrucks zurückzuziehen	39
Abbildung 15: Detailansicht der Rückstellfedern und der Muttern mit Feingewinde (M6x0,5), die als mechanischer Anschlag für die Rückstellbewegung der Beläge dienen. (1/6 Mutterumdrehung $\hat{=}$ 85 μ m, 2/6 Mutterumdrehung $\hat{=}$ 170 μ m). Oberes Bild: On-Brake-Phase / betätigte Bremse. Unteres Bild: Off-Brake-Phase / nicht betätigte Bremse.....	39
Abbildung 16: Harmonische Bremsdruckanregung mit einer Frequenz von 0,2 Hz sowie die Systemantwort in Form der vom OPS gemessenen Partikelanzahlkonzentration im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts). Spektralbildung mittels Hann-Fensterung über gesamte dargestellte Messzeit	41

Abbildung 17: Harmonische Geschwindigkeitsanregung mit einer Frequenz von 0,2 Hz sowie die Systemantwort in Form der vom OPS gemessenen Partikelanzahlkonzentration im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts) Spektralbildung mittels Hann-Fensterung über gesamte dargestellte Messzeit.....	41
Abbildung 19: Prozessführung von Bremsdruck p , Geschwindigkeit v und Temperatur T_S zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeiten $n(T_S)$ und $m(T_S)$ unter- und oberhalb der erwarteten kritischen Temperatur	44
Abbildung 21: Zeitverlauf von Bremsdruck p , Geschwindigkeit v , Temperatur T , Anzahlkonzentration N_{FMPS} (oben) und Anzahlgrößenverteilung des FMPS (unten) während der drei höchsten Temperaturstufen auf der ansteigenden Seite des Temperaturdreiecks für einen ECE-Belag mit organischem Bindemittel	46
Abbildung 22: Emittierte Anzahl an Partikel n_{FMPS} pro Bremsung aufgetragen über der durchschnittlichen Bremsscheibentemperatur T_S für einen ECE-Belag mit organischem Bindemittel und einem prototypischen Bremsbelag mit anorganischem Bindemittel	47
Abbildung 23: Zeitverlauf von Bremsdruck p , Geschwindigkeit v , Temperatur T_S und der OPS-Anzahlkonzentration N für einen ECE-Belag mit organischem Bindemittel (analog zu Abbildung 19). Trotz des zeitlich symmetrischen Temperaturprofils erfolgt eine zeitlich asymmetrische Systemantwort bzw. Emission, die eine Änderung der Temperaturabhängigkeit des Systems andeutet.	48
Abbildung 24: Korrelation der PM_{10} -Emission pro Bremsung (berechnet auf Grundlage der mit dem OPS gemessenen Größenverteilung und einer Dichte von $3,5 \text{ g/cm}^3$), der durchschnittlichen Scheibentemperatur T_S sowie des Reibwerts μ für einen ECE-Belag mit organischem Bindemittel.	49
Abbildung 25: Korrelation der PM_{10} -Emission pro Bremsung (berechnet auf Grundlage der mit dem OPS gemessenen Größenverteilung und einer Dichte von $5,0 \text{ g/cm}^3$), der durchschnittlichen Scheibentemperatur T sowie des Reibwerts μ für einen prototypischen Belag mit anorganischem Bindemittel.....	50
Abbildung 26: PM_{10} -Emission pro Bremsung gemittelt über jede Temperaturstufe für einen ECE-Belag mit organischem Bindemittel bei 50 und 123 km/h	51
Abbildung 28: Reibwert μ (links) und PM_{10} -Emission pro Bremsung (rechts, berechnet mit der OPS-Anzahlgrößenverteilung und einer Dichte von $3,5 \text{ g/cm}^3$) über der mittleren Scheibentemperatur T_S pro Bremsung für die Beläge mit organischem Bindemittel während des Temperaturdreieckstests unterhalb der kritischen Temperatur.	52
Abbildung 29: PM_{10} -Emission pro Bremsung in Abgas-WLTP-Fahrzyklen aufgetragen über der mittleren Scheibentemperatur während der Bremsung für einen ECE-Belag. Vergleichende Auswertung auf Datengrundlage des Experiments für simulative Vorhersage (Kapitel 8.2)	56
Abbildung 30: Verlauf der emittierten PM_{10} -Masse m_{OPS} über der Anzahl an Bremsungen während der Adaption vom jeweiligen Arbeitspunkt zum Referenzpunkt. Grauguss, glatt, ECE.....	58
Abbildung 31: Verlauf der emittierten PM_{10} -Masse über der Anzahl an Bremsungen während der Adaption vom jeweiligen Arbeitspunkt zum Referenzpunkt. Grauguss, gelocht, ECE.....	58
Abbildung 32: Verlauf der emittierten PM_{10} -Masse m_{OPS} über der Anzahl an Bremsungen während der Adaption vom jeweiligen Arbeitspunkt zum Referenzpunkt. Grauguss, glatt, NAO.....	59
Abbildung 33: Regression der in Abbildung 6 dargestellten Massen pro Bremsung über der Änderung der Gesamtpartikelzahl pro Bremsung. Eine ideale lineare Regression würde einem PT1-Glied entsprechen.....	60
Abbildung 34: Regressionsgüte des exponentiellen Erklärungsansatzes in Abhängigkeit der adaptionsbedingten Emissionsüberhöhung bzw. -verringerung	61

Abbildung 35: Zeitverläufe der emittierten Partikelmasse pro Bremsung für 8 Blöcke à 20 Schleppbremsungen im Referenzpunkt mit unterschiedlichen Geschwindigkeitshistorien (Arbeitspunkte 1-9)	62
Abbildung 36: Emissionsüberhöhung oder -verringerung der emittierten Partikelmasse pro Bremsung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitshistorie. Δm_B , Adapt = $m_{B20} - m_{B1}$	63
Abbildung 37: Zeitverläufe der emittierten Partikelmasse pro Bremsung für 8 Blöcke á 20 Schleppbremsungen im Referenzpunkt mit unterschiedlichen Bremsdruckhistorien (Arbeitspunkte 1-9)	64
Abbildung 38: Temporäre Emissionsüberhöhung oder –verringerung der emittierten Partikelmasse pro Bremsung in Abhängigkeit von der Bremsdruckhistorie. Δm_B , Adapt = $m_{B20} - m_{B1}$	65
Abbildung 39: Mikroskopaufnahmen an neun definierten Ausschnitten der Belagoberfläche eines ECE-Belages nach einem Block mit 30 Schleppbremsungen bei 80 km/h und 38 bar, angelehnt an die Tribometeruntersuchungen von Ostermeyer und Kijanski. 66	
Abbildung 40: Mikroskopaufnahmen an neun definierten Ausschnitten der Belagoberfläche eines ECE-Belages nach einem Block mit 30 Schleppbremsungen bei 80 km/h und 38 bar und anschließender manueller Reinigung mittels Druckluft.....	67
Abbildung 41: Mikroskopaufnahmen an neun definierten Ausschnitten der Belagoberfläche eines ECE-Belages nach einem Block mit 30 Schleppbremsungen bei 80 km/h und 38 bar.....	67
Abbildung 43: Mittelwerte der Massenkonzentration pro Bremsung, gemessen mit dem OPS in den je 20 Wiederholungen der 25 Arbeitspunkte des „AP-Wechsel-Kennfeldes“ ..	69
Abbildung 44: Mediane der Massenkonzentration gemessen im „AP-Wechsel-Kennfeld“ über Geschwindigkeit und Bremsdruck.	70
Abbildung 45: Mediane der Massenkonzentration gemessen im „AP-Block-Kennfeld“ über Geschwindigkeit und Bremsdruck.	70
Abbildung 46: Mediane der Konzentration über der Geschwindigkeit, gemessen im „AP-Wechsel-Kennfeld“ (gestrichelte Linie mit Kreuzen) sowie im „AP-Block-Kennfeld“ (durchgezogene Linie mit Kreisen) im Vergleich.....	71
Abbildung 47: Median der Anzahlkonzentration pro Arbeitspunkt, gemessen im „AP-Wechsel-Kennfeld“ mit OPS (links) und CPC (rechts). Darstellung über der Geschwindigkeit (oben) und über dem Bremsdruck (unten).	72
Abbildung 48: Mittlere Anzahlkonzentration pro Arbeitspunkt, gemessen im „AP-Wechsel-Kennfeld“ mit OPS (x-Achse) und CPC (y-Achse). Oberhalb der Hintergrundkonzentration des CPC liegen die Konzentrationen nahe einer Geraden mit der Steigung 1.....	73
Abbildung 49: Massen- über Anzahlkonzentration für Blöcke gleicher Geschwindigkeit aus der Vermessung des „AP-Block-Kennfeldes“ (links) sowie die per Regression berechnete Proportionalitätskonstante zwischen Massen- und Anzahlkonzentration über der Geschwindigkeit (rechts)	74
Abbildung 50: Kumulative Dichtefunktion der Anzahl- (oben) und Massengrößenverteilungen im „AP-Block-Kennfeld“ für die vier Bremsdrücke (Spalten) und die vier Geschwindigkeiten (farblich hervorgehobene Kurven).	74
Abbildung 51: Kumulative Dichtefunktion der Anzahl- (oben) und Massengrößenverteilungen im „AP-Wechsel-Kennfeld“ für die fünf Bremsdrücke (Spalten) und die fünf Geschwindigkeiten (farblich hervorgehobene Kurven).	75
Abbildung 52: Perzentile der Größenverteilung (25 %, 50 %, 75 %) über der Geschwindigkeit im „AP-Block-Kennfeld“ und WLTP im Vergleich, aufgetragen über der Geschwindigkeit.....	75
Abbildung 53: Perzentile der Größenverteilung (25 %, 50 %, 75 %) über der Geschwindigkeit im „AP-Wechsel-Kennfeld“ und WLTP im Vergleich, aufgetragen über der Geschwindigkeit.....	76

Abbildung 54: Serieller Verlauf der Größenverteilungsperzentile pro Bremsung (oben) und des Bremsdruckes, der Geschwindigkeit sowie der emittierten Masse pro Bremsung (unten). Die 550 Datenpunkte pro Bremsung wurden im Sinne der Übersichtlichkeit zu durchgehenden Linien ohne Marker pro Bremsung zusammengefasst.	76
Abbildung 55: Massenkonzentration im WLTP über der Geschwindigkeit (links) und dem Bremsdruck (rechts).....	77
Abbildung 56: Eigene Darstellung der veröffentlichten Daten von Farwick zum Hagen. Anzahlkonzentration gemessen mit einem Aerodynamischen Größenspektrometer (TSI APS) über der Geschwindigkeit in einem Los-Angeles-City-Traffic-Zyklus.....	78
Abbildung 57: Visualisierung des hypothetischen Erklärungsansatzes für den überproportionalen Geschwindigkeitseffekt $m \sim v^3$. Massengrößenverteilung für Bremsungen bei niedriger (oben) und hoher (unten) Geschwindigkeit (linke y-Achse). Impaktordurchlasskurve für Partikel, die die mittlere Belagdicke von 3,2 g/cm ³ aufweisen (rechts). Die Verschiebung der Größenverteilung hin zu kleineren Partikeldurchmessern bei hohen Geschwindigkeiten (Pfeil nach links) könnte zu dem überproportionalen Geschwindigkeitseffekt $m \sim v^3$ beitragen, indem bei kleinen Geschwindigkeiten ein größerer prozentualer Anteil der emittierten Verschleißmasse mit aerodynamischen Durchmessern größer 10 µm emittiert würde, somit vom Impaktor abgeschieden würde und die PM ₁₀ -Emission bei niedrigen Geschwindigkeiten relativ zu der PM ₁₀ -Emission bei hohen Geschwindigkeiten verringert. Die Hochrechnung ohne Impaktor ergibt sich aus der gemessenen Massengrößenverteilung mit Impaktor multipliziert mit dem Kehrwert der Impaktordurchlasskurve. Insbesondere für kleine Impaktordurchlasswerte (nahe null) steigt die Unsicherheit der Hochrechnung aufgrund der unbekannten Abweichung der real verwendeten Impaktorkurve von der aus der Literatur entnommenen Impaktorkurve.....	79
Abbildung 58:Pyramidenförmiger Versuchsplan zur Untersuchung der Geschwindigkeitsabhängigkeit und Reproduzierbarkeit von Off-Brake-Emissionen (oben links). Mittelwert ($n = 5$) der summierten Emission pro Geschwindigkeitsstufe in chronologischer Reihenfolge (unten links). Mittelwert und Standardabweichung ($n = 5$) der summierten Emission pro Geschwindigkeitsstufe über der Geschwindigkeit (rechts).	81
Abbildung 59: Geschwindigkeits-Zeitverlauf des Abgas-WLTP-Zyklus mit und ohne Belagrückstellung. Die Bremsung Nr. 54 ist durch eine vergrößerte Schnittdarstellung hervorgehoben.	83
Abbildung 61: Massengrößenverteilung für beide Konfigurationen (mit und ohne Rückstellung), gemessen mit OPS und FMPS. Der Übergangsbereich beider Geräte (untere Messbereichsgrenze OPS und obere Messbereichsgrenze FMPS) ist grün markiert. Die Größenverteilung wurde in diesem Bereich durch Interpolation abgeschätzt.....	85
Abbildung 63: Mittlere Emissionsfaktoren für die Messungen mit Bremse 2 mit und ohne Belagrückstellung bei unterschiedlichen Luftspaltbreiten.....	87
Abbildung 64: Mittlere PM ₁₀ -Emission pro Bremsung im WLTP und der Anteil der On-Brake (blau) sowie der Anteil der Off-Brake-Emission (orange) für Bremse 1 (links) und Bremse 2 (rechts) mit und ohne Belagrückstellung.....	88
Abbildung 65: Bremse 1: Massenemissionsrate aufgetragen über der Strecke und kumulierte Differenz (4,5 % des Emissionsfaktors ohne Rückstellung) mit und ohne Rückstellung	89
Abbildung 66: Bremse 2: Massenemissionsrate aufgetragen über der Strecke und kumulierte Differenz (4,5 % des Emissionsfaktors ohne Rückstellung) mit und ohne Rückstellung	90
Abbildung 67: Massenbilanz für die On-Brake-Phase (bzw. für Restschleifkräfte) mit Verschleißmasse als Eingang (orange), Belagkavitäten als Reservoir für Verschleißpartikel (blau) und Feinstaubemissionen als Ausgang (schwarz).	

Schematische Darstellung in Anlehnung an das Reservoir-Modell von Ostermeyer & Kijanski	92
Abbildung 68: Massenbilanz für die Off-Brake-Phase mit Belagkavitäten als Reservoir für Verschleißpartikel (blau) und Feinstaubemissionen als Ausgang (schwarz). Schematische Darstellung in Anlehnung an das Reservoir-Modell von Ostermeyer & Kijanski	92
Abbildung 69: Gravimetrisch ermittelte PM_{10} -Emissionsfaktoren für sieben exemplarische Reibpaarungen im WLTP-Zyklus (Abgas) mit drei Scheibenmaterialien GG = Grauguss, CCD = Ceramic Coated Disc, WC = Wolfram Carbide und zwei Reibmaterialklassen (ECE und NAO).....	96
Abbildung 70: Gravimetrische Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von Scheiben- (links oben), Belag- (rechts oben) und Gesamtverschleiß (unten).....	97
Abbildung 71: Gravimetrisch gemessene PM_{10} -Masse über dem mittels OPS berechneten Partikelvolumen zur Bestimmung der mittleren PM_{10} -Partikeldichte	98
Abbildung 72: Aus gravimetrischer Messung und Streulichtmessung berechnete mittlere PM_{10} -Streulichtdichte ρ^*	99
Abbildung 73: Gravimetrische Emissionsfaktoren in Abhängigkeit der berechneten PM_{10} -Streulichtdichte.....	99
Abbildung 74: Theoretische Impaktordurchlasskurve für verschiedene Partikeldichten (linke y-Achse) und gemessene Anzahlkonzentrationsverteilung (rechte y-Achse) einer Grauguss-ECE-Reibpaarung	101
Abbildung 76: Zeitverläufe der gemessenen und simulierten (Druck, Geschwindigkeit und Reibhistorie) Massenkonzentration für einen WLTP mit 122 kgm ² (linke y-Achse) sowie die Differenz der kumulierten PM_{10} -Masse (rechte y-Achse) bezogen auf die momentane Strecke $s(t)$	105
Abbildung 77: Gemessene und simulierte Emissionsfaktoren für drei Trägheitsmomente über dem mittleren Bremsdruck mit zwei Modellen (1. Druck, Geschwindigkeit. 2. Druck, Geschwindigkeit und Reibhistorie).....	106
Abbildung 78: Simulierte Emissionsfaktoren (aus Abbildung 77) aufgetragen über den gemessenen Emissionsfaktoren.....	106
Abbildung 79: Korrelation zwischen simulierter (Kennfeld ohne Reibhistorie) und gemessener Massenemission pro Bremsung in den 55 Einzelbremsungen des WLTP.	107
Abbildung 80: Korrelation zwischen simulierter (Kennfeld und Reibhistorie) und gemessener Massenemission pro Bremsung in den 55 Einzelbremsungen des WLTP.....	108
Abbildung 81: Quotienten aus simulierter und gemessener Massenemission pro Bremsung über den Einflussgrößen Bremsdruck, Durchschnittsgeschwindigkeit pro Bremsung, durchschnittliche Scheibentemperatur pro Bremsung und Reibhistorie für das Druck-Geschwindigkeits-Kennfeld	109
Abbildung 82: Quotienten aus simulierter und gemessener Massenemission pro Bremsung über den Einflussgrößen Bremsdruck, Durchschnittsgeschwindigkeit pro Bremsung, durchschnittliche Scheibentemperatur pro Bremsung und Reibhistorie für das Druck-Geschwindigkeits-Kennfeld mit Reibhistorienmodellierung.....	110
Abbildung 83: Insbesondere im Falle ultrafeiner Partikel variiert die Emissionsdauer. Als standardisierte Bewertungsgröße wird daher die kumulierte Partikelanzahl ab Emissionsstart (Beginn der Bremsung plus Totzeit der Messstrecke) bis zu dem Zeitpunkt definiert, an dem die Anzahlkonzentration kleiner als 10 % der in dieser Bremsung erreichten Maximalkonzentration ist.	114
Abbildung 84: Visualisierung der Untersuchungsmethodik zur Bestimmung der zeitlichen Auflösung der Messstrecke anhand von künstlich erzeugten Daten. Eingangs- und Ausgangssignal im Zeitbereich (links) und nach Fast Fourier Transformation im Frequenzbereich (rechts). Bei der exemplarischen Druckanregung mit 15±5 bar bei 0,2 Hz antwortet das hypothetische System mit einer Emissionsrate von 17±5 mg s ⁻¹ bei ebenfalls 0,2 Hz.	115

Abbildung 85: Amplitude der mit dem OPS gemessenen Anzahlkonzentration (Systemantwort) über der Bremsdruckamplitude (Systemanregung) für fünf Anregungsamplituden und drei Wiederholungen pro Anregungsamplitude	116
Abbildung 86: Amplitude der mit dem OPS gemessenen Anzahlkonzentration (Systemantwort) über der Geschwindigkeitsamplitude (Systemanregung) für fünf Anregungsamplituden und fünf Wiederholungen pro Anregungsamplitude.....	116
Abbildung 87: Lineare Regression der emittierten Masse pro Bremsung über der Bremsscheibentemperatur für zwei Geschwindigkeiten in Versuchen mit Temperaturdreiecken.	117
Abbildung 89: Mittelwerte der Scheibentemperatur während des WLTP mit und ohne Belagrückstellung, gemessen mit einem eingebetteten Thermoelement. Es trat kein signifikanter Temperaturunterschied auf, da die Standardabweichung höher als die Differenz der Mittelwerte ist.	119
Tabelle 1: Drehmoment-Geschwindigkeitsarbeitspunkte für mehrstufige Temperaturdreiecke	33
Tabelle 2: Überblick über mögliche Modelle für die Entstehung von Off-Brake-Emissionen, deren grundsätzliche Wirkkette, Modellvorhersagen sowie der aktuellen Kenntnisstand bezüglich deren Gültigkeit.....	93

Kurzzusammenfassung

Der Betrieb von Scheibenbremsen geht mit der Emission von Verschleißpartikeln einher, die wesentlich zur Gesamtemission von Pkw beiträgt. Für zukünftige Fahrzeugentwicklungen besteht ein Bedarf danach, Stellhebel im Sinne von potentiellen Einflussgrößen auf das Emissionsverhalten zu kennen, um diese als Reduktionsmaßnahmen gezielt nutzen zu können. Hieraus leiten sich die Fragestellungen ab, welche Einflussgrößen auf das Partikelemissionsverhalten existieren und welchen quantitativen Effekt diese Einflussgrößen auf Emissionsgrößen wie die Partikelmassen- und Partikelanzahlemission haben. Darauf aufbauend leitet sich zudem die Frage ab, welche Mechanismen für diese Effekte ursächlich sind.

Hypothetische Reduktionsansätze sind die Änderung der Fahrzeugmasse, die indirekte Beeinflussung von Scheibentemperaturen, die Vermeidung von Restschleifmomenten sowie die Verwendung emissionsarmer Reibmaterialien. Der Stand der Forschung enthält diesbezüglich keine umfassende empirische Erkenntnisgrundlage. Eine weitere bekannte Reduktionsmaßnahme ist eine anteilige Substitution der Reibbremse durch regenerative Bremssysteme. Fahrzeuge mit geringer elektrischer Antriebsleistung können jedoch nur einen leistungsabhängigen Anteil der Reibbremsbetätigungen vermeiden. Ein empirisches Modell (Black-Box) zur simulativen Vorhersage dieses Reduktionspotentials ist nach aktuellem Stand der Forschung nicht bekannt.

Der einerseits an empirischen Grundlagen orientierte und andererseits anwendungsorientierte Ansatz dieser Arbeit besteht daher in der empirischen Einflussgrößenanalyse und der darauf aufbauenden empirischen Modellbildung des Partikelemissionsverhaltens von Pkw-Scheibenbremsen auf einem Schwungmassenprüfstand, um den Effekt dieser Einflussgrößen vorherzusagen.

Die Einflussgrößenanalyse ergab, dass die Geschwindigkeit einen näherungsweise quadratischen bis kubischen Effekt auf PM_{10} -Emissionen aufweist, wohingegen der Effekt des Bremsdruckes auf die PM_{10} -Emission näherungsweise linear ist. Die Geschwindigkeit hat zudem einen gegenläufigen Effekt auf den mittleren Durchmesser PM_{10} -relevanter Partikel. Hiermit lässt sich der überproportionale Effekt der Geschwindigkeit qualitativ erklären, da hohe Geschwindigkeiten die Emission kleiner Partikeldurchmesser begünstigen und somit überproportional häufig den Abscheidedurchmesser von PM_{10} unterschreiten könnten.

Neben dem dominanten Effekt der Geschwindigkeit weist das Emissionsverhalten zudem zeitvariante Effekte in Abhängigkeit der Geschwindigkeits- und Druckhistorie bzw. der Temperaturhistorie auf. Versuchsergebnisse deuten auf ein Reservoirverhalten des Belages bzw. auf thermische Zersetzungsprozesse als ursächliche Mechanismen für das zeitvariante

Verhalten hin. Das Reservoirverhalten wurde darüber hinaus als Hauptquelle für Emissionen bei nicht betätigter Bremse identifiziert.

Die empirischen Erkenntnisse sind in einem Modell zusammengeführt, das zur Vorhersage von PM_{10} -Emissionen in WLTP-Fahrzyklen mit variablen Trägheitsmomenten verwendet wurde. Die in diesen Fahrzyklen simulativ vorhergesagte Massenemission stimmt dabei mit der gemessenen Massenemission bis auf eine maximale kumulative Abweichung pro Zyklus von 30 % überein und weist eine maximale Abweichung pro Einzelbremsung um bis zu Faktor 4 auf. Eine Analyse der Abweichung pro Einzelbremsung ergibt keine Korrelation zu bekannten Einflussgrößen. Es bleibt offen, ob die Modellierung anderer, bisher unbekannter Einflussgrößen, diese Varianz senken kann.

Die vorliegende Arbeit erweitert zusammenfassend den Stand der Forschung um eine quantitative Beschreibung des Partikelemissionsverhaltens von Scheibenbremsen in Abhängigkeit von Betriebsgrößen, Reibmaterialien sowie konstruktiven Parametern. Des Weiteren ergänzt sie den bisherigen Erkenntnisstand dahingehend, dass ursächliche Mechanismen für das empirisch beschriebene Verhalten diskutiert und eingegrenzt sind und neue oder weiterhin bestehende Erkenntnislücken konkret aufgezeigt werden.

“The more we learn about the world, and the deeper our learning, the more conscious, specific, and articulate will be our knowledge of what we do not know; our knowledge of our ignorance. For this indeed, is the main source of our ignorance - the fact that our knowledge can be only finite, while our ignorance must necessarily be infinite.”

Karl Popper

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Verschleiß von Scheibenbremsen geht mit der Emission von Feinstaub in Form von PM_{10} und ultrafeinen Partikeln einher¹, deren emittierte Masse bzw. Anzahl je nach Schätzung in der gleichen Größenordnung wie die von Verbrennungsmotoren liegt. Im Rahmen der informellen Arbeitsgruppe PMP (Particle Measurement Program), die der europäischen Wirtschaftskommission UNECE untergeordnet ist, wird daher auf technischer Ebene eine gesetzliche Emissionsregulierung analog zu der von Verbrennungskraftmotoren erarbeitet. Ansätze zur Reduktion von Bremspartikelemissionen sind daher Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung. Ein Ansatz besteht darin, den Einsatz von Reibbremsen durch regeneratives Bremsen teilweise oder vollständig zu ersetzen. In Abhängigkeit des Rekuperationspotentials von Pkw können jedoch nicht alle Betätigungen der Reibbremse in realen Fahrzyklen vermieden werden. Um verschiedene Elektrifizierungsgrade und Rekuperationsstrategien hinsichtlich ihres Potentials zur Emissionsreduktion zu bewerten, ohne Prüfstandsversuche durchführen zu müssen, ist für den zukünftigen Entwicklungsprozess von Interesse, Bremspartikelemissionen simulativ vorherzusagen. Zudem ist die grundlegende qualitative und quantitative Kenntnis von Einflussgrößen eine Voraussetzung zur gezielten Beeinflussung der Emissionseigenschaften eines Pkw im Entwicklungsprozess des Fahrzeugs. Das langfristige Ziel besteht darin, ein grundlegendes Wissen über „Emissionsstellhebel“ für zukünftige Fahrzeugentwicklungen zu generieren. Die zentrale grundlagenorientierte Forschungsfrage der Arbeit lautet daher:

1. *Welche Einflussgrößen auf das Emissionsverhalten von Pkw-Scheibenbremsen existieren und wie können diese quantifiziert werden?*

Darauf aufbauend ist die Beantwortung der folgenden anwendungsorientierten Forschungsfrage notwendig, um das längerfristige Ziel der Simulation von Bremspartikelemissionen zu erreichen:

2. *Welche Einflussgrößen müssen in einem Modell abgebildet sein, um Bremspartikelemissionen in Fahrzyklen simulativ vorherzusagen?*

Aufgrund der Komplexität der anwendungsorientierten Fragestellung liegt der Fokus der Arbeit auf dem empirischen Grundlagenteil, der nach wissenschaftlicher Erkenntnis sucht, die zum einen wiederum in die anwendungsorientierte Fragestellung der Vorhersage ein-

¹ Grigoratos, T.; Martini, G.: Brake wear particle emissions (2015).

fließt und zum anderen eine Erkenntnisgrundlage für die Entwicklung und Bewertung potentieller Reduktionsansätze darstellt.

1.2 Forschungsmethodik und Struktur der Arbeit

Wie anhand der zentralen Forschungsfragen erläutert, besteht die in Kapitel 1 beschriebene Motivation sowie die Zielsetzung der Arbeit aus einem anwendungsorientierten und einem grundlagenmotivierten Teil. Kapitel 2 beschreibt den Stand der Technik bezüglich der messtechnischen Prinzipien, die im experimentellen Aufbau zur Messung der Bremsstaub-aerosole verwendet werden. In Kapitel 3 wird der Stand der Forschung zusammengefasst und detaillierte Forschungsfragen in Bezug auf Einflussgrößen werden abgeleitet. Kapitel 4 umfasst die Untersuchungsmethodik, bestehend aus dem experimentellen Aufbau, der Methode zur Bestimmung des zeitlichen Auflösungsvermögens der Messstrecke sowie den Versuchsplänen, die die Quantifizierung der Einflussgrößen zum Ziel haben. Die mittels dieser Untersuchungsmethoden generierten Ergebnisse und Erkenntnisse sind Gegenstand der Kapitel 5 bis 7. In Kapitel 8 werden die zuvor gewonnenen Erkenntnisse in ein Simulationsmodell überführt und zur Vorhersage von Bremspartikelemissionen verwendet. Die Vorhersagegüte des Modells wird unter Variation einer Eingangsgröße kumulativ und zeitaufgelöst bewertet, um abzuleiten, welche weiteren Fragestellungen zur Steigerung der Vorhersagegüte untersucht werden sollten. Das abschließende Kapitel 9 fasst die neu generierten Erkenntnisse zusammen und konkretisiert auf Grundlage dieser Erkenntnisse den weiteren Forschungsbedarf. Die Struktur der Arbeit ist in Abbildung 1 dargestellt. Zudem sind darin die Forschungsfragen aufgelistet, die in dem jeweiligen Kapitel beantwortet werden.

Entsprechend der Gliederung der Arbeit in die Ergebniskapitel Systemidentifikation², Betriebsgrößen^{3 4 5}, Konstruktive Einflussgrößen⁶ und Kennfeldbasierte Vorhersage^{7 8} sind die Inhalte dieser Kapitel Gegenstand vorangegangener Veröffentlichungen.

² Niemann, H. et al.: System Identification Method for Brake Particle Emission Measurements (2018).

³ Niemann, H. et al.: Map based simulation of brake wear particle emissions (2020).

⁴ Niemann, H. et al.: Influence of Disc Temperature on Particle Emissions of Disc Brakes (2020).

⁵ Niemann, H. et al.: Untersuchung des Partikelemissionsverhaltens von Scheibenbremsen (2019).

⁶ Niemann, H. et al.: Influence of pad retraction and air gap width on PM10 wear emissions (2021).

⁷ Niemann, H. et al.: Map based simulation of brake wear particle emissions (2020).

⁸ Niemann, H. et al.: Application of a Sampling Enclosure for the Identification of the Influencing Parameters on Brake Wear Particle Emissions (2019).

Motivation und Zielsetzung Kap. 1	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Einflussgrößen auf das Emissionsverhalten von Pkw-Scheibenbremsen existieren und wie können diese quantifiziert werden? • Welche Einflussgrößen müssen in einem Modell abgebildet sein, um Bremspartikelemissionen in Fahrzyklen simulativ vorherzusagen?
Stand der Forschung Kap. 2 + 3	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Erkenntnisse über Einflussgrößen liegen im Stand der Forschung vor? • Welche Einflussgrößen müssen nach aktuellem Stand der Forschung quantifiziert werden, um Bremspartikelemissionen vorhersagen zu können?
Untersuchungs- methodik Kap. 4	<ul style="list-style-type: none"> • Mit welchen Methoden können Einflussgrößen auf die Partikelemission quantifiziert werden?
Ergebnisse Kap. 5 + 6 + 7	<ul style="list-style-type: none"> • Welchen quantitativen Effekt haben die untersuchten Einflussgrößen auf die Partikelemission? • Welche neuen Einflussgrößen wurden identifiziert?
Modellierung Kap. 8	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Einflussgrößen müssen im Modell abgebildet werden, um Bremspartikelemissionen vorherzusagen? • Welche Vorhersagegüte kann mit diesem Modell erreicht werden? • Welche weiteren Erkenntnisse sind notwendig, um die Vorhersagegüte zu erhöhen?
Fazit Kap. 9	<ul style="list-style-type: none"> • Mit welchen Erkenntnissen wurde der Stand der Forschung ergänzt? • Welche neuen Forschungsfragen leiten sich aus diesen Erkenntnissen ab?

Abbildung 1: Struktur der Arbeit und übergeordnete Forschungsfragen

2 Stand der Technik auf dem Gebiet der Aerosolmessprinzipien

Die geplante, gesetzliche Regulierung von Bremspartikelemissionen wird nach heutigem Stand sowohl Grenzwerte der emittierten Partikelmasse als auch der Partikelanzahl umfassen⁹. Daraus abgeleitete Messgrößen zur Erfassung der Partikelmassen- und Anzahlemission sind in Abschnitt 4.1 im Detail definiert. Das vorliegende Kapitel beschreibt zunächst Messprinzipien, die zur Erfassung dieser Messgrößen geeignet sind und im experimentellen Aufbau Anwendung finden.

Als Partikelmasse ist in diesem Zusammenhang eine Teilmenge der luftgetragenen Partikelmasse unterhalb eines bestimmten Abscheidedurchmessers definiert. Gebräuchliche aerodynamische Abscheidedurchmesser betragen 2,5 bzw. 10 μm ¹⁰. In Bezug auf Trennschärfe und Sammelvermögen sind Impaktoren nach heutigem Stand der Technik „das Mittel der Wahl zur Bestimmung der Aerosolmassengrößenverteilung“^{11 a}. Das Funktionsprinzip von Impaktoren ist in Abschnitt 2.1 beschrieben. Aus der geplanten Reglementierung der Partikelmassenemission leitet sich neben der Notwendigkeit zur Klassifizierung des Aerosols ebenfalls die Anforderung ab, die nach Abscheidung verbleibende Partikelmasse messtechnisch zu erfassen. Diese Anforderung wird durch das Messprinzip der gravimetrischen Messung mittels Filtern erfüllt^{11b}. Das Messprinzip ist in Abschnitt 2.2 beschrieben und ermöglicht die Bestimmung eines kumulativen Massenmesswertes während eines Messzeitraums. Für eine Erfassung der emittierten Partikelgrößenverteilung und indirekt der Partikelmasse in Echtzeit eignen sich unter anderem Streulichtmessverfahren (z.B. TSI Optical Particle Sizer) sowie Spektrometer basierend auf dem Impaktorprinzip (z.B. Dekati Electrical Low Pressure Impactor). Das Prinzip der Streulichtmessung umfasst den Messbereich grober und feiner Partikel oberhalb einer Größenordnung von ca. 100 nm. Es ist in Abschnitt 2.3 beschrieben.

Die messtechnische Erfassung der Partikelanzahl des Bremsstaubaerosols wie sie ebenfalls für die geplante Reglementierung erforderlich ist, kann mittels Kondensationspartikelzählung ab einer Größenordnung von ca. 3 nm erfolgen^{11c}. Zur Messung der Größenverteilung ultrafeiner Partikel kleiner 100 nm eignen sich Messprinzipien auf Grundlage der elektrischen Mobilität von Partikeln^{11d}. Dieses Messverfahren ist

⁹ Grigoratos, T.: Workshop – Towards a regulation on brake wear emissions (2021), S. 4.

¹⁰ DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM10-oder PM2,5-Massenkonzentration ; Deutsche Fassung EN 12341:2014 (2014).

¹¹ Baron, P. A. et al.: Aerosol measurement (2011), (a) S. 129 | (b) S. 122 ff. | (c) S. 381 ff. | (d) S. 339 ff. | (e) S. 129 ff.

Gegenstand von Abschnitt 2.5. Eine Übersicht über alle im vorliegenden Kapitel beschriebenen Messprinzipien ist in Abbildung 2 grafisch dargestellt.

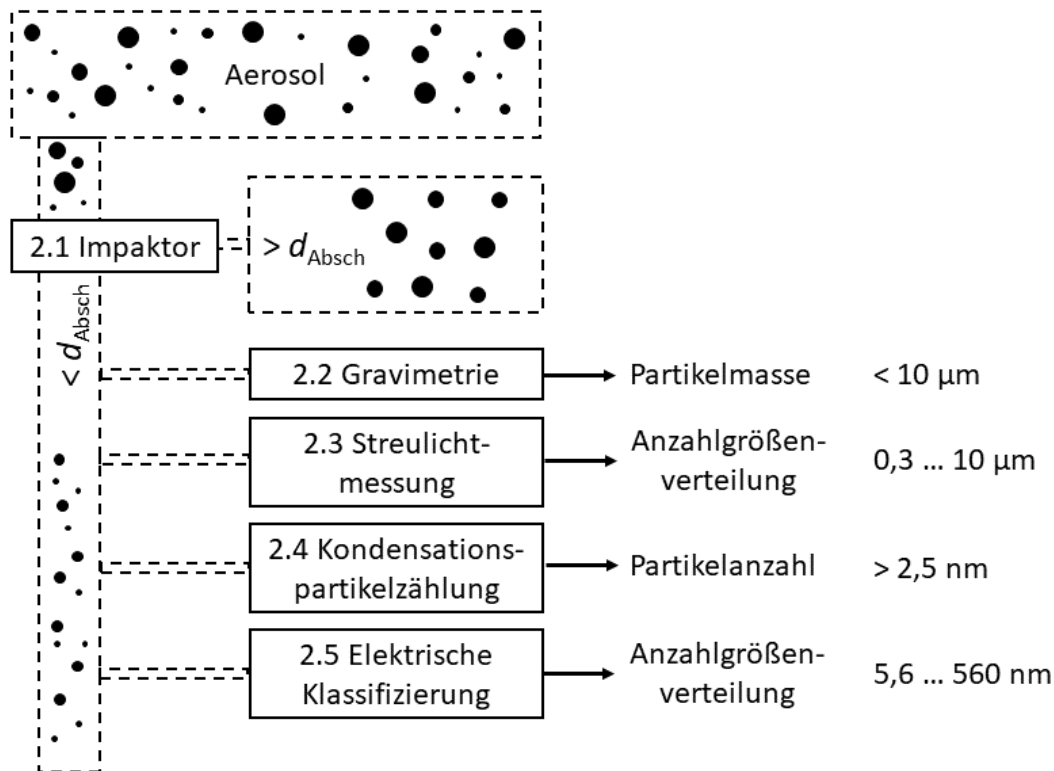


Abbildung 2: Grafische Übersicht über die im vorliegenden Kapitel beschriebenen Messprinzipien, ihre Ausgangsgrößen und exemplarische Messbereiche: 2.1 Größenklassifizierung mittels Impaktorprinzip, 2.2 Ermittlung der Partikelmasse mittels Gravimetrie, 2.3 Streulichtmessung der Anzahlgrößenverteilung feiner und grober Partikel, 2.4 Bestimmung der Partikelanzahl mittels Kondensationspartikelzählung, 2.5 Ermittlung der Anzahlgrößenverteilung ultrafeiner und feiner Partikel mittels elektrischer Klassifizierung

2.1 Impaktor

Die Klassifizierung von Partikeln mit Hilfe von Impaktoren beruht auf dem Prinzip der Trägheitsabscheidung^{11e 14}. Hierbei wird ein Aerosolstrom mittels einer Düse beschleunigt. Hinter der Düse ist eine Prallplatte positioniert, die den Fluidstrom umlenkt. Kleine Partikel (im Sinne eines kleinen aerodynamischen Durchmessers) folgen dem umgelenkten Fluidstrom und passieren die Prallplatte, wohingegen Partikel mit einer zu großen Trägheit den Stromlinien nicht folgen können und mit der Prallplatte kollidieren, auf der sie nach dem Aufprall verharren. Die das Abscheideverhalten beeinflussenden, konstruktiven Parameter eines Impaktors sind der Düsendurchmesser und der Prallplattenabstand. Durch eine Reihenschaltung mehrerer Impaktorstufen mit fortschreitend schärferer Umlenkung ist es möglich, das Aerosol in mehrere Größenintervalle zu klassieren. Konventionelle

¹⁴ Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1 (2009), S. 207 f.

Impaktoren ermöglichen eine Klassifizierung von Partikelgrößen bis herunter zu 20 nm. Mit Hilfe von Niederdruck (z. B. im Electrical Low Pressure Impactor) kann diese Untergrenze bis auf 7 nm herabgesetzt werden.

Als charakteristische Kenngröße, die das Abscheideverhalten einer Impaktorstufe beschreibt, wird die Stokes-Zahl herangezogen. Diese ist in diesem Zusammenhang definiert als Verhältnis des Anhalteweges eines Partikels s_p zur charakteristischen Länge des Hindernisses:

$$St = \frac{s_p}{L_{\text{char}}} \quad 2.1$$

Die Stokes-Zahl hängt von dem eingangs erwähnten aerodynamischen Durchmesser d_{ae} des Partikels, der Partikeldichte ρ_p , der Strömungsgeschwindigkeit v_{Fl} , dem Schlupfkorrekturfaktor C_{Cunn} , der Viskosität η sowie dem Düsendurchmesser $d_{\text{Düse}}$ ab:

$$St = \frac{\rho_p d_{\text{ae}}^2 v_{\text{Fl}} C_{\text{Cunn}}}{9 \eta d_{\text{Düse}}} \quad 2.2$$

Die Masse der abgeschiedenen Partikel kann entweder in Echtzeit mittels einer Quarz-Mikrowaage auf den Prallplatten erfolgen oder durch anschließende manuelle, gravimetrische Wägung.

2.2 Gravimetrie¹⁵

Zur gravimetrischen Messung der Partikelmassenkonzentration wird ein Aerosol durch einen gewogenen Filter gesaugt. Die im Aerosol enthaltenen Partikel werden im Filter abgeschieden und erhöhen somit die Gesamtmasse des Filters, die durch anschließendes Wiegen ermittelt wird. Durch Differenzbildung der Filtermasse vor und nach der Messung ergibt sich die abgeschiedene Partikelmasse. Um die Partikelmassenkonzentration zu ermitteln, wird die Partikelmasse ins Verhältnis zum angesaugten Gasvolumen gesetzt. Die Methode ist zeitaufwändig, liefert jedoch zuverlässige Ergebnisse und ermöglicht eine nachträgliche Untersuchung der abgeschiedenen Partikel.

¹⁵ Nach Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1 (2009), S. 202

2.3 Streulichtmessung^{16,17}

Die Konzentration und Größenverteilung von Aerosolen kann mit Hilfe von Streulichtmessverfahren untersucht werden^{15b 18}. Diese nutzen die Wechselwirkung von Partikeln mit elektromagnetischer Strahlung aus, um Rückschlüsse auf Konzentration und Größenverteilung des Aerosols zu ziehen. Streulichtverfahren werden unterschieden in Messungen an Einzelpartikeln sowie an Partikelkollektiven. Partikel werden zur Beschreibung ihrer optischen Eigenschaften in drei Bereiche unterteilt. Hierzu wird der Partikelgrößenparameter α herangezogen, der proportional zum Verhältnis des Partikelumfangs $\pi \cdot d_p$ zur Wellenlänge λ der elektromagnetischen Strahlung ist:

$$\alpha = \frac{\pi d_p}{\lambda} \quad 2.3$$

Die hiermit definierten Bereiche sind:

- Rayleigh-Bereich ($\alpha \ll 1$)
- Mie-Bereich ($0,1 < \alpha < 10$)
- Fraunhofer-Bereich bzw. Bereich der geometrischen Optik ($\alpha \gg 1$)

Im Fraunhofer-Bereich treten die drei Phänomene Beugung, Reflektion und Brechung auf, die unter dem Oberbegriff Streuung zusammengefasst werden. Die jeweiligen Streulichtkoeffizienten Q stehen in proportionalem Zusammenhang zur Intensität des gestreuten Lichtes I_{Str} :

$$I_{\text{Str}} = I_0 \cdot \frac{\pi}{4 r^2} d_p^2 Q(\varphi, \alpha, \vartheta) \quad 2.4$$

Zudem hängt die Streulichtintensität proportional von der Intensität des einfallenden Lichtes I_0 , reziprok quadratisch von dem Abstand zur Streulichtquelle r sowie proportional von der Projektionsfläche des Partikels und damit quadratisch von dem Partikeldurchmesser d_p ab. Der Streulichtkoeffizient wiederum ist abhängig vom Streuwinkel φ , von dem Partikelgrößenparameter α sowie vom komplexen Brechungsindex ϑ . Letzterer ist eine Materialeigenschaft, deren Realteil das Reflektionsverhalten und dessen Imaginärteil das Absorptionsverhalten eines Materials beschreibt. Die drei Streulichtkoeffizienten Q setzen sich additiv zum gesamten Streulichtkoeffizienten zusammen:

¹⁶ Nach Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1 (2009), S.178 ff..

¹⁷ Nach Tränkler, H.-R.; Reindl, L. M.: Sensortechnik (2014), S. 1020 ff.

¹⁸ Nach Tränkler, H.-R.; Reindl, L. M.: Sensortechnik (2014), S. 1020 ff.

$$Q(\varphi, \alpha, \vartheta) = Q_{\text{Beu}}(\varphi, \alpha) + Q_{\text{Ref}}(\varphi, \vartheta) + Q_{\text{Br}}(\varphi, \vartheta) \quad 2.5$$

Da die Intensität des gebeugten Lichtes Q_{Beu} materialunabhängig ist und nur unter kleinen Streuwinkeln auftritt, eignet sie sich zur Messung der Partikelgrößenverteilung kugelförmiger Partikel, sofern der Brechungsindex unbekannt ist. Dies gilt ebenfalls außerhalb des Fraunhofer-Bereiches. Innerhalb des Fraunhofer-Bereichs lässt sich zudem auch für nicht kugelförmige Partikel der Partikelquerschnitt senkrecht zur Streuachse anhand der gemessenen Streulichtintensität bestimmen.

Das reflektierte Licht (Q_{Ref}) tritt unter allen Streuwinkeln ($0-180^\circ$) auf, wohingegen gebrochenes Licht in Abhängigkeit des Brechungsindex innerhalb des Winkelbereichs

$$\varphi \leq 2 \arccos \left(\frac{1}{\vartheta} \right) \quad 2.6$$

gestreut wird.

Wie aus Formel 2.4 ersichtlich ist, hängt die Streulichtintensität innerhalb des Fraunhofer-Bereiches vom Quadrat des Partikeldurchmessers ab. Im Rayleigh-Bereich liegt ein Zusammenhang zum Quadrat des Partikelvolumens – also zur sechsten Potenz des Partikeldurchmessers – vor. Dies gilt ebenfalls für nicht kugelförmige Partikel. Bei bekanntem Brechungsindex und bekannter Dichte ermöglicht dieser Zusammenhang eine Messung der Partikelmasse anhand der Streulichtintensität. Die Abhängigkeit der Intensität zur sechsten Potenz des Partikeldurchmessers ist zudem der maßgeblich beschränkende Faktor für die untere Detektionsgrenze für optische Partikeldetektoren, die bei ca. $0,05 \mu\text{m}$ liegt.

Der Bereich zwischen Rayleigh und Fraunhofer kann anhand der Mie-Theorie beschrieben werden. Diese Theorie umfasst als Grenzfälle ebenfalls den Rayleigh- und Fraunhofer-Bereich. Aus ihr geht hervor, dass zwischen Streulichtintensität und Partikelgröße kein eindeutiger Zusammenhang besteht, weshalb präzise Größenvorhersagen in diesem Bereich erschwert sind. Erschwerend kommt die stark inhomogene räumliche Verteilung der Streulichtintensität hinzu, die jedoch auch im Fraunhofer-Bereich auftritt.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Messung von Größenverteilungen eines Aerosols mit unbekanntem Brechungsindex besteht im starken Effekt des Brechungsindex auf die gemessene Intensität. In der Praxis wird die Kalibrierung von Streulichtmessgeräten mit Hilfe von monodispersen Standard-Pulvern bekannter Größenverteilung durchgeführt. Die gemessenen Größenverteilungen sind dementsprechend lediglich für Stoffe mit ähnlichen optischen Eigenschaften gültig. Hieran wird deutlich, dass mittels Streulichtverfahren keine geometrischen Partikeldurchmesser, sondern optische Streulichtdurchmesser gemessen werden, die äquivalent zum Streulicht der Partikel des verwendeten Kalibrier-aerosols sind.

2.4 Kondensationspartikelzählung²⁰

Kondensationspartikelzähler ermöglichen die Zählung von Partikeln ohne Messung einer Größeninformation. Über eine Vorklassierung (z. B. mittels eines Differentiellen Mobilitätsanalysators) lassen sich jedoch auch Anzahlkonzentrationen in den jeweiligen Klassifizierungsintervallen bestimmen. Der Messbereich von Kondensationskernzählen reicht dabei herunter bis zu einer Partikelgröße von ca. 3 nm, wobei sehr hohe Konzentrationen von bis zu $5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ gemessen werden können. Zu diesem Zweck wird der Aerosolstrom durch einen mit gesättigtem Dampf (z. B. Alkoholdampf) gefüllten Behälter geleitet und somit bis zur Sättigung angereichert. Die Wand des Behälters ist saugfähig und mit der Flüssigkeit getränkt, die den Alkoholdampf zur Verfügung stellt. Anschließend wird der Aerosolstrom durch ein Kondensationsrohr geleitet, in dem der Dampf durch Abkühlung zur Kondensation gebracht wird. Die Partikel dienen hierbei als Kondensationskerne und bilden den Ursprung für die Entstehung von annähernd gleich großen Fluidtropfen (μm -Größenordnung), die von einem optischen Partikelzähler mittels Streulicht- oder Extinktionsmessung detektiert werden. Um die Detektionsgrenze niedrig zu halten, ist eine möglichst hohe Sättigung wünschenswert, wobei jedoch eine homogene Nukleation (Tröpfchenbildung ohne Partikel als Nukleationskeim) vermieden werden muss.

2.5 Elektrische Mobilität²¹

Die elektrische Mobilität eines Partikels beschreibt die auf die elektrische Feldstärke bezogene und von der Partikelgröße abhängige Verharrungsgeschwindigkeit eines Partikels, das sich in einem elektrischen Feld bewegt. Diese charakteristische Größe wird als Abscheidekriterium innerhalb eines elektrostatischen Klassierers genutzt, um Partikel einer bestimmten Größenklasse aus einem Aerosol herauszufiltern. Dazu wird das Aerosol elektrostatisch aufgeladen und durch einen zylindrischen Ringspalt geführt. Innerhalb des Ringspaltes liegt ein elektrisches Feld an, das zu einer überlagerten Partikelbewegung in radialer Zylinderrichtung führt. Die radiale Geschwindigkeit des Partikels ist unter anderem abhängig von der angelegten elektrischen Feldstärke und dem Partikeldurchmesser. Bei zeitlich konstanter Feldstärke kann auf diese Weise eine Partikelgrößenklasse durch einen Spalt abgeschieden und einem zählenden Messverfahren (z. B. Kondensationskernzähler) zugeführt werden. Durch kontinuierliche oder abgestufte, zeitliche Variation der elektrischen Feldstärke kann die Anzahlgrößenverteilung des Aerosols bestimmt werden.

²⁰ Nach Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1 (2009). S.193 ff.

²¹ Nach Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1 (2009), S.195 f.

3 Stand der Forschung auf dem Gebiet der Bremspartikelemissionen

Der hier präsentierte Stand der Forschung auf dem Gebiet der Einflussgrößen auf Bremspartikelemissionen untergliedert sich in Betriebsgrößen der Bremse (Bremsdruck, Geschwindigkeit, Temperatur, Reibhistorie), konstruktive Größen, tribologische Beobachtungen hinsichtlich Generierung und Transports von Verschleißpartikeln sowie Emissionsmodelle zur Vorhersage von Bremspartikelemissionen. Basierend auf diesem Kenntnisstand wird der aktuelle Forschungsbedarf anhand von Forschungsfragen aufgezeigt.

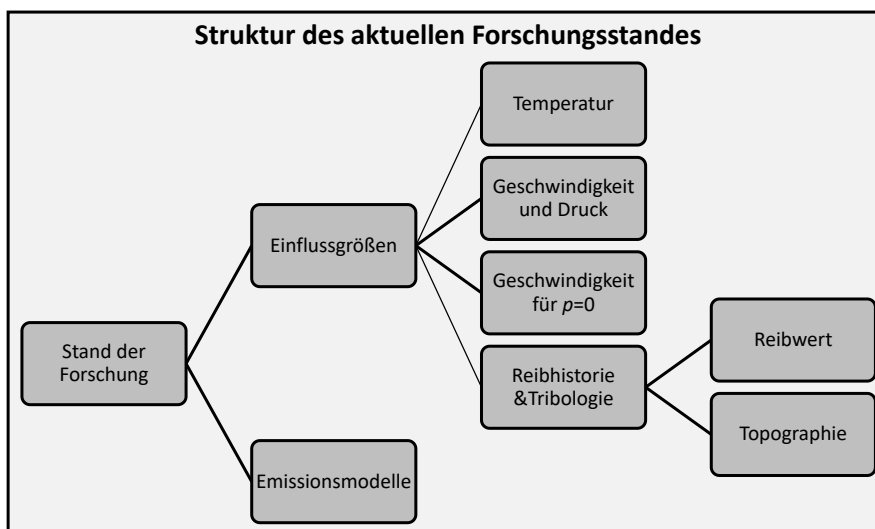


Abbildung 3: Struktur des vorliegenden Kapitels bezüglich des aktuellen Forschungsstandes von Einflussgrößen auf die Partikelemission von Scheibenbremsen

3.1 Betriebsgrößen der Bremse

3.1.1 Bremsscheibentemperatur²²

In der Literatur werden zwei Mechanismen diskutiert, die für die Entstehung von Bremspartikelemissionen ursächlich sein könnten und in erster Näherung Partikel zweier Größenklassen generieren. Als Ursache für grobe und feine Partikel ($d_p > 100nm$) werden mechanische Reibprozesse angeführt, wohingegen ultrafeine Partikel ($d_p < 100nm$) insbesondere durch thermisch verursachte Nukleationsprozesse erklärt werden^{23 24}.

²² Nach Niemann, H. et al.: Influence of Disc Temperature on Particle Emissions (2020), 2 f.

²³ Asbach, C. et al.: Entstehung von Fein- und Ultrafeinstaub beim Bremsen (2018). , S. 60

Nukleationsprozesse treten unter anderem auf, wenn Feststoffe durch thermische Einwirkung in den gasförmigen Aggregatzustand übergehen, abgekühlt werden, kondensieren und Partikelagglomerate in der Größenordnung weniger Nanometer bilden. Im Kontext atmosphärischer Aerosole werden diese Partikel gemäß des Whitby-Modells in der sogenannten Nukleationsmode zusammengefasst²⁵. Abbildung 4 veranschaulicht diese beiden Partikelmoden exemplarisch anhand des Zeitverlaufs einer Bremsung. Der durch Nukleation bedingte sprunghafte Anstieg der Partikelanzahlkonzentration wurde von zahlreichen Autoren sowohl in Versuchen auf Tribometer-Prüfständen als auch auf Schwungmassenprüfständen beschrieben. Nachfolgend wird der Stand der Forschung bezüglich des Temperatureffektes auf feine und ultrafeine Bremspartikelemissionen zusammengefasst.

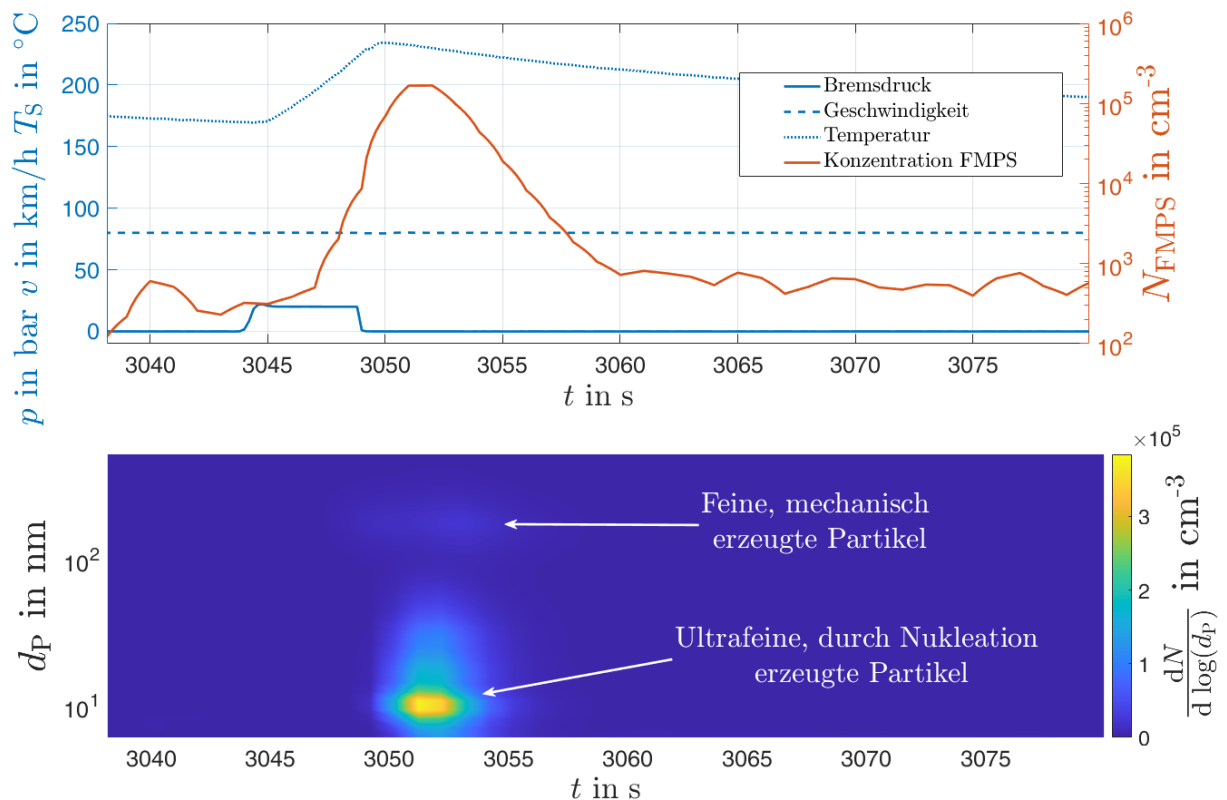


Abbildung 4: Zeitverlauf einer Bremsung aus einem Temperaturdreiecksversuch (siehe Abschnitt 4.3.1) mit einer maximalen Scheibentemperatur von 200 °C. Neben den feinen, mechanisch generierten Partikeln entstehen ultrafeine Nukleationspartikel durch das Überschreiten einer kritischen Temperaturgrenze. Die Mode der feinen Partikel erstreckt sich über den hier dargestellten Messbereich des FMPS hinaus zu größeren Durchmessern bis in den kleinen, einstelligen Mikrometerbereich.

Ramousse et al.²⁶ führten differentielle Thermoanalysen sowie Massenspektrometer-Analysen von Bremsbelagmaterialien durch. Ihre Untersuchung ergab, dass die Zersetzung

²⁴ Namgung, H.-G. et al.: Generation of Nanoparticles from Friction (2016), S. 8.

²⁵ Baron, P. A. et al.: Aerosol measurement (2011), S. 34 f. und 44 ff.

²⁶ S. Ramousse et al.: Thermal Characterization of Brake Pads (2001), S. 942.

des Belagbindemittels bei 250 °C beginnt, Koks sich zweistufig zwischen 300 °C bis 700 °C, Eisen sich zwischen 500 °C bis 800 °C und Graphit sich zwischen 600 °C bis 800 °C zersetzt.

Nosko et al. führten Tribometermessungen mit Reibgeschwindigkeiten von bis zu 2,6 m/s durch^{27 28 29}. Die Temperatur wurde durch Erhöhung der Gleitgeschwindigkeit variiert, sodass keine unabhängige Variation der Temperatur vorlag. Er nennt eine kritische Temperatur von ca. 170 °C für die Erzeugung ultrafeiner Partikel. Die Emission von Grob- und Feinstaubpartikeln zwischen 100 nm und 10 µm (elektrischer Mobilitätsdurchmesser / Streulichtdurchmesser) steigt in diesen Untersuchungen mit zunehmender Temperatur monoton an. Zur Quantifizierung des Temperatureffektes verwendet er auf die Reibungsenergie normierte Emissionskoeffizienten.

Die Untersuchungen von Alemani et al.³⁰ auf einem Tribometer zeigten einen starken Temperatureffekt auf die stationäre Anzahlkonzentration, der die Sensitivitäten von Flächenpressung, Reibgeschwindigkeit und Reibungsleistung übersteigt. Die Messungen ergaben zudem einen sprunghaften Anstieg um vier Größenordnungen der Anzahlkonzentration im Bereich von 170–190 °C, was mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen übereinstimmt. Sie vermuten einen Zersetzungsprozess von phenolischen Bindemitteln im Reibbelag als mögliche Ursache für diesen Anstieg.

Eine Tribometer-Studie von Perricone et al.³¹ stimmt mit den oben beschriebenen Schlussfolgerungen diesbezüglich überein, dass ein Anstieg der Anzahlkonzentration ultrafeiner Partikel um vier bis sechs Größenordnungen auftritt, wenn eine kritische Temperatur von 165 °C bis 190 °C überschritten wird.

In Messungen von Sachse et al.³² mittels eines Schwungmassenprüfstandes ohne Einhausung wurde eine Verschiebung des Maximums der Partikelanzahlgrößenverteilung von 100 nm auf 20 nm bei unterschiedlichen Starttemperaturen des Bremsvorgangs festgestellt. Sachse et al. nennen eine kritische Temperatur von 180 °C, ab der die Anzahlkonzentration um mindestens eine Größenordnung ansteigt.

Agudelo et al.³³ untersuchten den Effekt der mittleren Bremsanfangstemperatur auf die Partikelanzahl-Emissionsrate während verschiedener standardisierter Fahrzyklen auf einem eingehausten Schwungmassenprüfstand. Die höchsten durchschnittlichen Emissionsraten

²⁷ Nosko, O. et al.: Temperature effect on emission of airborne wear particles from car brakes (2015).

²⁸ Nosko, O.; Olofsson, U.: Quantification of particulate matter generated by wear of brake materials (2017).

²⁹ Nosko, O. et al.: Emission of 1.3–10 nm airborne particles from brake materials (2017).

³⁰ Alemani, M. et al.: On the influence of car brake system parameters on particulate emissions (2018).

³¹ Perricone, G. et al.: A concept for reducing PM 10 emissions for car brakes by 50% (2018).

³² Sachse, H.: Untersuchungen zu geeigneten Messmethoden bremseninduzierter Emissionen (2015).

³³ Agudelo, C. et al.: Systematic assessment of the influence on brake emissions (2016).

traten bei den höchsten Durchschnittstemperaturen auf. Es trat ein Trend zu hohen Emissionsraten bei hohen Temperaturen auf, jedoch wurde die Temperatur nicht unabhängig variiert.

Kukutschová et al.³⁴ beobachteten Nukleationsereignisse in Untersuchungen auf einem Schwungmassenprüfstand bei durchschnittlichen Scheibentemperaturen von 300 °C und somit bei deutlich höheren Temperaturen als in anderen Veröffentlichungen angegeben. Basierend auf einer differentiellen thermischen Analyse bestimmte Kukutschová heterogene Zersetzungstemperaturen von Bindematerialien (300 °C), Koks (400 °C), Graphit (550 °C) und Eisen (750 °C).

Untersuchungen auf einem geschlossenen Schwungmassenprüfstand von Mathissen und Farwick zum Hagen et al.^{35 36 37 38} ergaben ebenfalls kritische Temperaturen für die Bildung von Nukleationspartikeln bei etwa 150 °C Scheibentemperatur. Experimente mit Gebrauchtteilen ergaben, dass die Nukleationsereignisse nach einer Laufleistung von 6000 km nicht reproduzierbar waren³⁹. Während des LACT (Los Angeles City Traffic) Fahrzyklus konnte keine Korrelation zwischen PM_{10} und Scheibentemperatur bestimmt werden⁴⁰.

Zusammenfassend beschreibt der Stand der Forschung thermisch bedingte Zersetzungsprozesse einzelner Belagbestandteile^{41 42}, die als ursächlich für die Emission ultrafeiner Partikel diskutiert werden⁴³. Die niedrigsten Zersetzungstemperaturen weisen organische Belagbindemittel auf. Aus Tribometerversuchen (Pin-On-Disc) ist zudem der Effekt der Scheibentemperatur auf die Emission ultrafeiner und feiner sowie grober Partikel bekannt^{44 45 46 47 48}. Bezüglich ultrafeiner Partikel stimmen diese Erkenntnisse mit Beobachtungen

³⁴ Kukutschová, J. et al.: On airborne wear particles released from automotive brakes (2011).

³⁵ Ferdinand H. Farwick zum Hagen: Dissertation, Investigation of Brake Wear Particle Emissions (2019).

³⁶ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019).

³⁷ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: On-road vehicle measurements of brake wear emissions (2019).

³⁸ Mathissen, M. et al.: A novel real-world braking cycle for studying brake wear particle emissions (2018).

³⁹ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: On-road vehicle measurements of brake emissions (2019).

⁴⁰ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019), S. 5147.

⁴¹ S. Ramousse et al.: Thermal Characterisation of Brake Pads (2001), S. 942.

⁴² Kukutschová, J. et al.: On airborne nano/micro-sized wear particles released from brakes (2011), S. 1001.

⁴³ Asbach, C. et al.: Entstehung und Messung von Fein- und Ultrafeinstaub beim Bremsen (2018), S. 47.

⁴⁴ Nosko, O. et al.: Temperature effect on emission of airborne wear particles from car brakes (2015).

⁴⁵ Nosko, O.; Olofsson, U.: Quantification of ultrafine airborne particulate matter by brake materials (2017).

⁴⁶ Nosko, O. et al.: Emission of 1.3–10 nm airborne particles from brake materials (2017).

⁴⁷ Alemani, M. et al.: On the influence of car brake parameters on particulate matter emissions (2018).

⁴⁸ Perricone, G. et al.: A concept for reducing PM 10 emissions for car brakes by 50% (2018).

aus Versuchen mit Schwungmassenprüfständen überein⁴⁹. Einzelne Beobachtungen weisen darauf hin, dass die thermisch bedingte Emission ultrafeiner Partikel möglicherweise in Abhängigkeit des Belagverschleißes oder der thermischen Vorbelastung abnimmt. In Tribometerversuchen wurde eine Änderung der Abhängigkeit $PM_{10}(T_s)$ oberhalb einer kritischen Temperatur beobachtet, die von den Autoren auf Zersetzungsprozesse zurückgeführt wird⁵⁰. Ein Effekt der Scheibentemperatur auf die Emission feiner und grober Partikel (PM_{10}) wurde auf einem Schwungmassenprüfstand noch nicht unabhängig von anderen Betriebsgrößen wie Druck, Geschwindigkeit und Reibhistorie identifiziert⁵¹. Der Forschungsstand zeigt somit die nachfolgenden, bisher unbeantworteten Fragestellungen auf.

Ultrafeine Bremspartikelemissionen:

1. Ist es möglich, Nukleationsereignisse zu vermeiden oder die kritische Temperatur durch die Substitution organischer Belagbindemittel zu erhöhen?
2. Inwiefern wird die emittierte Partikelmenge in Folge von bremsbedingten Nukleationsereignissen durch thermische Zersetzungsprozesse von Belagmaterialien beeinflusst?

Feine und grobe Bremspartikelemissionen (PM_{10}):

1. Mittels welcher Methoden kann der Effekt der Scheibentemperatur auf die PM_{10} -Emission in einem Schwungmassenprüfstandsversuch bestimmt werden?
2. Verändern thermische Zersetzungsprozesse der Belagmaterialien durch Überschreiten kritischer Zersetzungstemperaturen die Abhängigkeit der PM_{10} -Emission von der Scheibentemperatur?
3. Inwiefern beeinflussen thermische Zersetzungsprozesse der Belagmaterialien die Reproduzierbarkeit von temperaturabhängigen PM_{10} -Emissionskennfeldern?

3.1.2 Bremsgeschwindigkeit und -druck

Mosleh^{52a} untersuchte Partikelemissionen auf einem Pin-on-Disc-Prüfstand unter Variation der Flächenpressung ($p = 0,125 \dots 1,25 \text{ MPa}$) und der Reibgeschwindigkeit ($v = 0,275 \text{ m/s}$). Die Abriebpartikel wurden in einer Aluminiumschale gesammelt, zur Messung der Partikelgrößenverteilung in einer Trägerflüssigkeit dispergiert und somit der Streulichtdurchmesser bestimmt. Es wurden zwei Versuchsreihen bei konstanter niedriger Geschwindigkeit ($v = 0,275 \text{ m/s}$) durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe erfolgte eine Variation der Flächenpressung in drei Stufen, die jeweils über der Zeit konstant gehalten wurden. Im Gegensatz hierzu fand in der zweiten Versuchsreihe eine periodische Variation

⁴⁹ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019), S. 5147.

⁵⁰ Perricone, G. et al.: A concept for reducing PM 10 emissions for car brakes by 50% (2018), S. 140.

⁵¹ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019), S. 5147.

⁵² Mosleh, M. et al.: Characteristics and morphology of particles from disk brake s (2004). | (b) S. 1133

zwischen $p = 0$ und der jeweiligen Flächenpressung statt, sodass kein kontinuierlicher Kontakt zwischen Scheiben- und Belagsprobe stattfand. Die gemessene Streulichtgrößenverteilung war bimodal mit einem konstanten Häufigkeitsmaximum bei 350 nm und einem zweiten Maximum, das je nach Flächenpressung zwischen 2 und 15 μm variierte. Der diskontinuierliche Kontakt resultierte in einer Verschiebung des zweiten Häufigkeitsmaximums hin zu einem niedrigeren Streulichtdurchmesser von 2–3 μm . Als Ursache werden hierfür Agglomerationsprozesse der Verschleißpartikel in der Reibschicht zwischen Belag und Scheibe diskutiert. Diese Agglomerationsprozesse führen zu einem Anwachsen der Verschleißpartikel. Im Falle des diskontinuierlichen Kontaktes wird dieser Prozess des Anwachsens vermieden^{52b}.

In Untersuchungen von Gramstat⁵³ auf einem Schwungmassenprüfstand wurden die größenabhängigen Partikelkonzentrationen mit Hilfe eines elektrischen Mobilitätsspektrometers während dreier „Speed-Pressure-Sensitivity“-Sektionen des AK-Master-Zyklus gemessen. Diese Sektionen beinhalten jeweils acht Verzögerungsbremungen mit Geschwindigkeiten zwischen 120–80 km/h, 160–130 km/h und 200–170 km/h. Pro Geschwindigkeitsstufe erfolgt eine sukzessive Druckerhöhung um 10 bar bis zu einem Maximaldruck von 80 bar. Zwischen 60 und 80 bar trat ein monotoner Anstieg der Partikelanzahlkonzentration auf. Für die niedrigeren Drücke wurde im Rahmen der Auswertung kein Zusammenhang zwischen Bremsdruck und Partikelanzahlkonzentration festgestellt. Gramstat beschreibt jedoch eine ansteigende Partikelanzahlkonzentration mit zunehmender Ausgangsgeschwindigkeit.

In einer Pin-on-Disc-Studie analysierte Alemani⁵⁴ die Partikelgrößenverteilung und -masse anhand des aerodynamischen Durchmessers in Abhängigkeit von Bremsdruck und Reibgeschwindigkeit. Er verwendete hierzu Schleppbremsungen mit einer Gesamtreibstrecke von ca. 14 km. Im Rahmen der durchgeführten Sensitivitätsanalyse wurden neun Arbeitspunkte vermessen, die nach Erreichen der Verharrungstemperatur ebenfalls stationär bezüglich der Temperatur waren. Es stellten sich Verharrungstemperaturen zwischen 120 °C und 300 °C ein. Um eine Aussage über den Effekt der Reibleistung treffen zu können, wurden insbesondere Paare von Arbeitspunkten mit gleicher Reibleistung ausgewählt. Die vermessenen Sensitivitäten deuten darauf hin, dass grobe und feine Partikel sensitiv bezüglich der Reibgeschwindigkeit generiert werden und die Entstehung ultrafeiner Partikel sensitiv bezüglich Flächenpressung und Reibleistung ist. Diese Sensitivitäten sind jedoch klein im Vergleich zum Effekt der Temperatur bei Überschreiten der kritischen Temperatur, die in Abschnitt 3.1.1 beschrieben ist.

In Messungen von Wahlström⁵⁵ wurden ebenfalls Emissionskennfelder in Abhängigkeit von Flächenpressung und Reibgeschwindigkeit auf einem Pin-On-Disc-Prüfstand vermes-

⁵³ Gramstat, S.: Investigations of brake particle emissions (2017).

⁵⁴ Alemani, M. et al.: On the influence of car brake system parameters on particulate emissions (2018).

⁵⁵ Wahlström, J. et al.: Contact Pressure and Sliding Velocity Maps of Friction, Wear and Emission (2017).

sen. Hierbei wurden die Partikelanzahlkonzentrationen der groben Fraktion mit einem optischen Partikelzähler, die Anzahlkonzentration der feinen und ultrafeinen Fraktion mittels eines elektrischen Mobilitätsspektrometers und die Partikelmasse mit Hilfe eines Impaktors gemessen. Ähnlich der Versuchsreihe von Alemani wurden Schleppbremsungen mit einer Reibdistanz von 14 km durchgeführt. Unterhalb einer Scheibentemperatur von 200 °C nimmt der spezifische Verschleiß des Belag-Pins, der Reibkoeffizient sowie die Massen- und Anzahlkonzentration der emittierten Partikel mit zunehmender Flächenpressung und Reibgeschwindigkeit ab. Der spezifische Verschleiß der Scheibe zeigt das gleiche Verhalten auf, jedoch weitgehend unabhängig von der Temperatur. Insbesondere bei hohen Temperaturen zeigte sich ein instabiles Emissionsverhalten mit hohen Standardabweichungen innerhalb der drei Versuchswiederholungen. Sowohl Wahlström als auch Alemani verfolgen das Ziel, Emissionskoeffizienten aus ihren Messungen abzuleiten, die als Materialkonstante zur Parametrierung komplexer Simulationsmodelle (FEM, Zellulärautomaten) dienen. Dieser Ansatz wird in Abschnitt 3.2 gemeinsam mit dem aus den Abschnitten 3.1.2 (Bremsdruck und -geschwindigkeit) sowie 3.2 (Emissionsmodelle) abgeleiteten Forschungsbedarf beschrieben.

3.1.3 Rollgeschwindigkeit und Off-Brake-Emission

Der Betrieb einer Scheibenbremse unterteilt sich in Phasen mit betätigter Bremse ($p \neq 0$) und nicht betätigter Bremse ($p = 0$). Diese Arbeit verwendet hierzu nachfolgend die Begriffe On-Brake- und Off-Brake-Emission.

Sachse et al.⁵⁶ beschreiben das Phänomen der „Nachemission“ als erneuten Anstieg der Anzahlkonzentration, nachdem die Bremse gelöst wurde. In ihren Experimenten auf einem Dynamometer ohne Einhausung beobachten sie diese Nachemissionen insbesondere bei Festsattelbremsen in Anpassungsbremsungen (Endgeschwindigkeit ungleich Null). Als Erklärung für dieses Phänomen diskutieren sie den größeren Luftspalt zwischen Belag und Scheibe, da dies zu einer „Durchlüftung“ der Reibzone nach dem Ablassen des Bremsdrucks führen könnte.

Hagino et al.⁵⁷ untersuchten die PM_{10} - und $PM_{2,5}$ -Emissionen während der Beschleunigung nach Bremsvorgängen. In einem vollfaktoriellen Versuchsplan analysieren sie den Effekt von Anfangsgeschwindigkeit und Verzögerung auf die Partikelemission. In allen Experimenten trat ein signifikanter Anteil der Gesamtemission beim Beschleunigen auf. Zudem stiegen sowohl die On- als auch Off-Brake-Emissionen mit steigender Anfangsgeschwindigkeit der (vorangegangenen) Bremsung. Des Weiteren wurde eine asymptotisch abnehmende Konzentration über der Zeit während Off-Brake-Phasen mit konstanter Geschwin-

⁵⁶ Sachse, H.: Untersuchungen zu geeigneten Messmethoden bremseninduzierter Emissionen (2015).

⁵⁷ Hagino, H. et al.: Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating (2015).

digkeit beobachtet. In einer weiteren Studie diskutieren sie den Bremswiderstand als Ursache für die Off-Brake-Emission⁵⁸.

Der Autor der vorliegenden Arbeit⁵⁹ verwendete in früheren Studien harmonische Drehzahlanregungssignale, um die Korrelation von Rollgeschwindigkeit und Anzahlkonzentration zu untersuchen, die mit einem optischen Partikelmessgerät (TSI OPS) und einem Kondensationspartikelzähler (TSI CPC) gemessen wurden. Korreliert mit der sinusförmigen Geschwindigkeitsanregung ohne Bremsdruck zeigt die OPS-Zahlenkonzentration eine periodische, nichtharmonische Antwort des Systems mit einer Phasenverschiebung und einer asymptotischen Abnahme über der Zeit, was auf eine nichtlineare Geschwindigkeitsabhängigkeit der Off-Brake-Emission hinweist.

Farwick zum Hagen et al.⁶⁰ fanden ebenfalls eine zunehmende Konzentration von Off-Brake-Emissionen mit zunehmender Geschwindigkeit und schätzen, dass Off-Brake-Emissionen während eines Los Angeles City Traffic Zyklus (LACT) ca. 34 % zur gesamten luftgetragenen Partikelmassenemission beitragen.

Außerdem wurden Tests mit und ohne Bremssattel bei verschiedenen konstanten Ausrollgeschwindigkeiten während eines Versuchs mit Geschwindigkeitspyramiden durchgeführt. Die Versuche zeigten eine steigende Anzahlkonzentration des aerodynamischen Partikelspektrometers APS mit zunehmender Geschwindigkeit⁶¹. Die APS-Anzahlkonzentration wurde über die ansteigende und abfallende Seite der Geschwindigkeitspyramide gemittelt. Abbildung 5 visualisiert die Daten von Farwick zum Hagen, ergänzt durch hypothetische, analytische Funktionen zwischen Anzahlkonzentration und Geschwindigkeit. Im log-lin-Diagramm ist eine exponentielle Beziehung als Gerade zu erkennen, die qualitativ den gemessenen Daten entspricht. Lineare, quadratische und kubische Funktionen sind augenscheinlich nicht geeignet, um die Daten aus diesen Messungen zu beschreiben. Aus dem Stand der Forschung sind jedoch keine analytischen Modelle bekannt, die die Abhängigkeit der Off-Brake-Emissionen von der Rollgeschwindigkeit beschreiben und somit mit diesen Beobachtungen verglichen werden könnten.

In den gleichen Experimenten mit und ohne montierten Bremssattel fanden Farwick zum Hagen et al. heraus, dass die APS-Zahlenkonzentration während des Ausrollens ohne Bremssattel um eine Größenordnung niedriger ist als mit Bremssattel (Abbildung 5), was mit einer Abnahme des Schleppmoments um 6 Nm bei demontiertem Bremssattel korrelierte. Sie schlussfolgerten: „Folglich scheint Bremsenverschleiß während der Fahrt erzeugt zu werden, obwohl die Bremse gelöst ist. Dies bestätigt die Partikelgenerierung

⁵⁸ Hagino, H. et al.: Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions (2016), S. 272.

⁵⁹ Niemann, H. et al.: System Identification Method for Brake Particle Emission Measurements (2018).

⁶⁰ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019).

⁶¹ Ferdinand H. Farwick zum Hagen: Dissertation, Investigation of Brake Wear Emissions (2019), 55 ff.

durch das Restschleifmoment, (...) die eine Folge der kontinuierlichen Bildung und Zerstörung von Drittkörperreischichten sein könnte“.

Datenquelle: Farwick zum Hagen (2019)
Study of Brake Wear Particle Emissions:
Impact of Braking and Cruising Conditions

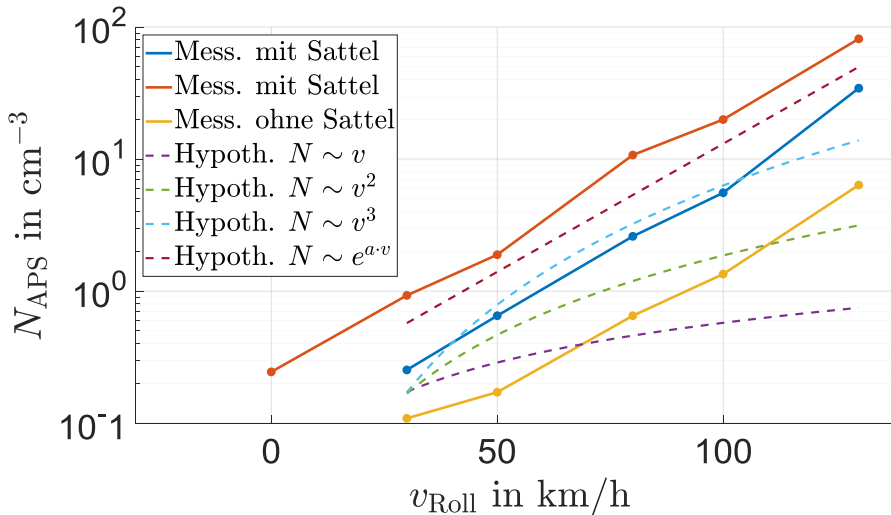


Abbildung 5: Visualisierung der Messdaten von Farwick zum Hagen. Die durchgezogenen Linien sind gemessene Datenpunkte, die der Publikation⁶² entnommen sind und die gestrichelten Linien stellen hypothetische funktionale Beziehungen zwischen APS-Anzahlkonzentration und Geschwindigkeit dar

Matthissen et al.⁶³ untersuchten mit Hilfe von Pyramiden-Drehzahl-Testsignalen die Verschleißpartikelemission auf einem Gesamtfahrzeug-Rollenprüfstand und auf einem Komponenten-Schwungmassenprüfstand. Sie fanden eine Korrelation der Drehzahlstufen mit einem Anstieg der PM_{10} -Emissionen sowie der mit dem CPC gemessenen Anzahlkonzentration. Ähnlich wie bei Hagino et al.⁶⁴ ist für Phasen mit konstanter Geschwindigkeit eine asymptotische Abnahme über der Zeit zu erkennen.

Zusammenfassend beschreibt der Stand der Forschung Off-Brake-Emissionen sowohl unmittelbar nach Lösen der Bremse (Nachemission⁶⁶) als auch infolge von Beschleunigung⁶⁷ bzw. Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit⁶⁸ oder bedingt durch harmonische Testsignale⁶⁹. Als mögliche Ursachen werden eine Durchströmung des Luftspaltes zwischen Belag und Scheibe sowie Restschleifmomente diskutiert. Nach jetzigem Kenntnisstand

⁶² Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019), S. 5148.

⁶³ Mathissen, M. et al.: Brake Wear Particle Emissions on a Chassis Dynamometer (2019).

⁶⁴ Hagino, H. et al.: Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating (2015), S. 46.

⁶⁶ Sachse, H.: Untersuchungen zu Messmethoden bremseninduzierter Emissionen (2015), S. 10.

⁶⁷ Hagino, H. et al.: Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating (2015).

⁶⁸ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019), S. 5148.

⁶⁹ Niemann, H. et al.: System Identification Method for Brake Particle Emission Measurements (2018), S. 6.

sind folgende Forschungsfragen unbeantwortet oder es liegt kein wissenschaftlicher Konsens vor:

1. Lassen sich Off-Brake-Emissionen bei montiertem Bremssattel reduzieren oder sogar vermeiden (z. B. durch Belagrückstellung oder Variation des Luftspalts)?
2. Wie würde sich eine Reduzierung / Vermeidung von Off-Brake-Emissionen auf den PM_{10} -Emissionsfaktor in ganzen Testzyklen (z. B. WLTP) auswirken?
3. Was ist die physikalische Ursache für Off-Brake-Emissionen?

3.1.4 Reibhistorie und Tribologie der Bremse⁷⁰

Ostermeyer und Wilkening führten Studien zur Messung des Reibwertes und der Oberflächentopographie von Reibbelägen auf einem High-Load-Tribometer durch⁷¹. Der Versuchsplan beinhaltet unter anderem drei Blöcke à 30 Schleppbremsungen mit einem Bremsdruck von 30 bar, wobei die Geschwindigkeit im ersten und letzten Block 80 km/h und im mittleren Block 30 km/h beträgt. Der Reibwert weist dabei ein ausgeprägtes „langsame“, transientes Verhalten beim Übergang von Block 1 (80 km/h) zu Block 2 (30 km/h) auf. Die von Ostermeyer und Wilkening veröffentlichten Messdaten sind in Abbildung 6 in eigener Darstellung. Zeitlich korreliert zur transienten Anpassung des Reibwertes, verändert sich die Topographie der Belagoberfläche dahingehend, dass sich die Fläche des „realen Kontaktes“ in Form von Belagplateaus beim Übergang von Block 1 (80 km/h) zu Block 2 (30 km/h) wesentlich reduziert. Als Plateaus bzw. Patches bezeichnen sie harte Belaganteile (z. B. Metallfasern), die im Vergleich zur umgebenden Belagmatrix verschleißresistenter sind und den Großteil der Flächenpressung darstellen. Beim erneuten Übergang zu hohen Geschwindigkeiten (Block 2 zu Block 3) weisen sowohl der Reibwert als auch die Oberflächentopographie eine abrupte Anpassung zum Ausgangswert aus Block 1 auf.

⁷⁰ Nach Niemann, H. et al.: Untersuchung des Partikelemissionsverhaltens unter transienten Lasten (2019).

⁷¹ Ostermeyer, G. P.; Wilkening, L.: Experimental Investigations of the Topography Dynamics (2013).

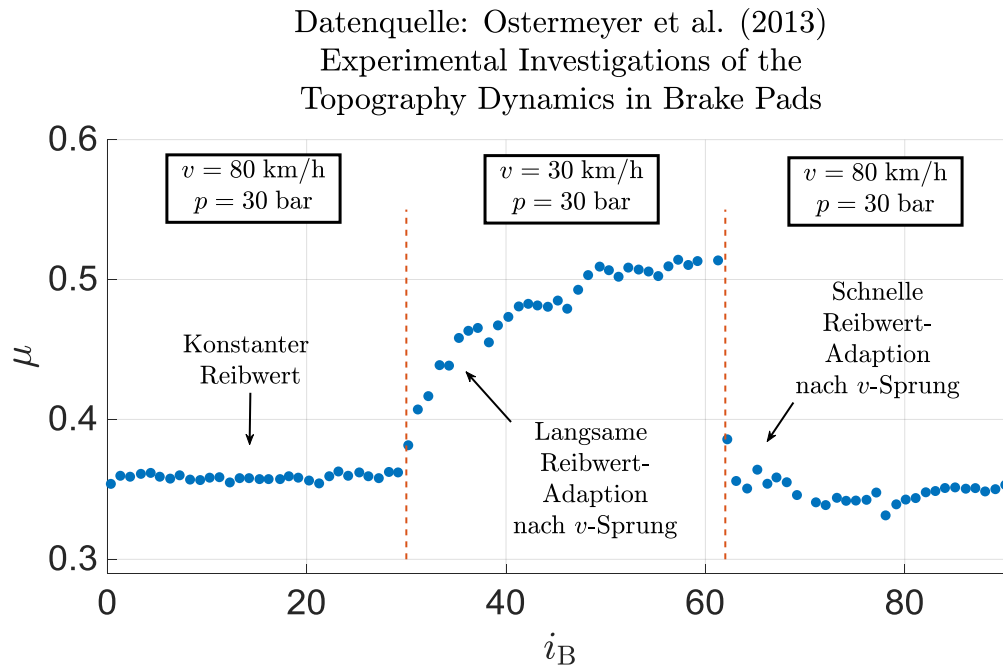


Abbildung 6: Darstellung der Reibwertanpassung auf Grundlage der Daten von Ostermeyer und Wilkening⁷¹ in einem Versuch mit drei Geschwindigkeitsblöcken bei Reibgeschwindigkeiten von 80 km/h, 30 km/h und 80 km/h

Ostermeyer⁷² beschreibt ein dynamisches Gleichgewicht von Patchaufbau und -zerstörung, das den Kontakt zwischen Bremsbelag und -scheibe charakterisiert. Dieses qualitative Modell deckt sich mit zahlreichen Beobachtungen aus der Literatur, wie z. B. von Eriksson⁷³ und Gramstat⁷⁴, die ebenfalls derartige Patches bzw. Plateaus beschreiben, deren Kontaktfläche sich dynamisch an den anliegenden Bremsdruck anpasst. Untersuchungen von Ostermeyer zeigen zudem, dass der Reibwert und die Belagoberflächentopographie sich nicht nur transient an neue Bremsdrücke, sondern auch an neu anliegende Reibgeschwindigkeiten anpassen.

Ostermeyer vermutet, dass die Dynamik dieses Tribofilms bzw. der Belagoberflächentopographie in kausalem Zusammenhang mit den dynamischen Phänomenen des Reibwerts steht⁷⁵. Zur quantitativen Beschreibung dieser Phänomene des Reibwertes führt er ein dynamisches Reibgesetz ein, das die Adaption des Reibwertes in Form eines PT1-Verhaltens beschreibt. Um die Dynamik des Reibwertes und der Oberflächentopographie gemeinsam in einem Modell qualitativ zu beschreiben, stellt er ein komplexeres Simulationsmodell auf Grundlage eines Zellulärautomaten vor. Wahlström⁷⁶ beschreibt ebenfalls ein Simulationsmodell basierend auf einem Zellulärautomaten, das zusätzlich zur

⁷² Ostermeyer, G. P.; Müller, M.: New insights into the tribology of brake systems (2008).

⁷³ Eriksson, M. et al.: Wear and contact conditions of brake pads (2001).

⁷⁴ Gramstat, S.: Methoden der in-situ Visualisierung der Reibzonendynamik (2015).

⁷⁵ Ostermeyer, G. P.; Wilkening, L.: Experimental Investigations of the Topography in Brake Pads (2013).

⁷⁶ Wahlström, J. et al.: A Cellular Automaton Approach to Simulate Contact Situation in Disc Brakes (2011).

Abbildung der Patchdynamik das Ziel hat, den Materialtransport aus der Reibzone heraus zu beschreiben.

In einer weiteren Versuchsreihe führten Ostermeyer und Kijanski Messungen mit einem ähnlichen Block-Versuchsplan bei gleichzeitiger automatisierter, messtechnischer Erfassung der Verschleißhöhe nach jeder Bremsung durch⁷⁷. Analog zu Reibwert und Oberflächentopographie weist die Verschleißrate der Belaghöhe ebenfalls einen asymptotischen Übergang von hohen zu niedrigen Geschwindigkeiten auf. Die Autoren führen diese Anpassung der Belaghöhenänderung darauf zurück, dass sich beim Übergang von hohen zu niedrigen Reibgeschwindigkeiten die Belagtäler neben den Plateaus zunächst mit Verschleißpartikeln füllen und somit die mittlere Belaghöhe kurzfristig stabilisieren.

Gramstat untersuchte die Bahn von Verschleißpartikeln mit Hilfe von Videoaufzeichnungen des Belages im Kontakt mit einer transparenten Borosilikatglasscheibe⁷⁸. Er zeigt auf, dass die Bahnen der Verschleißpartikel auf der Belagoberfläche durch Plateaus abgelenkt werden. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Verschleißpartikelbahnen bedingt durch Anpassungen der Oberflächentopographie ebenfalls dynamischen Änderungen unterworfen sind. Unter der (rein hypothetischen) Annahme, dass die Bewegung der Verschleißpartikel auf der Belagoberfläche einen Effekt auf das Emissionsverhalten besitzt, leitet sich die Frage ab, ob das Emissionsverhalten selbst ebenfalls dynamische Anpassungsprozesse aufweist.

Sachse verwendete einen Schwungmassenprüfstand, ein Messgerät zur Erfassung der elektrischen Partikelmobilität und einen Versuchsplan mit abwechselnden Blöcken hohen und niedrigen Bremsdrucks, um das transiente Emissionsverhalten zu untersuchen⁷⁹. Dabei traten abfallende Maxima der über der Zeit aufgetragenen Partikelanzahlkonzentration N beim Wechsel von niedrigen (ca. 15 bar) zu höheren Drücken (ca. 25 bar) auf, wobei innerhalb eines Blocks ebenfalls Anpassungen des Bremsdrucks zu beobachten waren. Umgekehrt zeigte sich ein Anstieg der maximalen Partikelanzahlkonzentration N bei Lastsprüngen von hohen (ca. 20 bar) zu niedrigeren Drücken (ca. 15 bar). Sachse führt dies auf die Ansammlung von Verschleißpartikeln in Phasen hoher Belastung zurück, die erst in Phasen niedriger Belastung wieder aus dem Tribofilm zwischen Belag und Scheibe entweichen und somit in die Umgebungsluft emittiert werden.

Zusammenfassend zeigt der Stand der Forschung Adaptionen des Reibwerts beim Wechsel des Betriebspunktes der Bremse auf, die mit Anpassungsvorgängen der Oberflächentopographie in Blockversuchen auf einem Tribometerprüfstand korrelieren⁸⁰. Ebenfalls in zeitlicher Korrelation hierzu wurden Anpassungsprozesse der mittleren

⁷⁷ Ostermeyer, G.-P.; Kijanski, J.: Surface Reservoir Dynamics in Friction Interfaces (2019).

⁷⁸ Gramstat, S.: Methoden der in-situ Visualisierung der Reibzonendynamik (2015).

⁷⁹ Sachse, H.: Untersuchungen zu geeigneten Messmethoden bremseninduzierter Emissionen (2015).

⁸⁰ Ostermeyer, G. P.; Wilkening, L.: Experimental Investigations of Topography Dynamics (2013).

Belaghöhenänderungsrate beobachtet⁸¹. Zeitlich ansteigende bzw. abnehmende Partikelmaximalkonzentrationen weisen zudem darauf hin, dass Partikelemissionen ebenfalls Anpassungsprozesse beim Wechsel des Betriebspunktes der Bremse aufweisen⁸². Ausgehend von dem beschriebenen Kenntnisstand leiten sich folgende Forschungsfragen ab:

1. Wie lässt sich das instationäre Emissionsverhalten von Pkw-Scheibenbremsen quantifizieren?
2. Wie können die aus der Literatur bekannten Erklärungsansätze für instationäres Partikelemissionsverhalten überprüft werden?

3.2 Emissionsmodelle

Olofsson⁸³ leitet ein Modell zur Beschreibung des Emissionsverhaltens von Reibkontakten her. Dazu geht er vom Holm'schen Reibgesetz aus:

$$\frac{V_V}{s_{\text{Reib}}} = \frac{k_V F_N}{H} \quad 3.1$$

Dieses beschreibt das Verschleißvolumen V_V normiert auf die Reibstrecke s_{Reib} in Abhängigkeit vom Verschleißkoeffizienten k_V , der Normalkraft F_N und der Härte H des Materials. Ausgehend von diesem linearen Reibgesetz trifft er die Annahme, dass alle Verschleißpartikel halbkugelförmig mit Durchmesser d_p sind und dass vollständige Plastizität zwischen den Reibpartnern vorliegt. Dies führt auf einen Partikelkoeffizienten, der die Wahrscheinlichkeit beschreibt, dass ein Verschleißpartikel als Feinstaub in die Umgebung emittiert wird:

$$\frac{n_p}{s_{\text{Reib}}} = k_p \frac{4 F_N}{H \pi d_p^3} \quad 3.2$$

Der Partikelkoeffizient wird in Abhängigkeit der Normalkraft empirisch anhand von Messungen auf einem Tribometerprüfstand bestimmt.

Wahlström⁸⁴ nutzt darauf aufbauend ein Finite-Elemente-Modell, um die Partikelemission von Scheibenbremsen zu simulieren. Innerhalb der FEM-Simulation werden die Flächenpressungsverteilung sowie der Verschleiß zwischen Belag und Scheibe simuliert. Die Verschleißberechnung erfolgt auf Grundlage des linearen Verschleißgesetzes von Holm-

⁸¹ Ostermeyer, G.-P.; Kijanski, J.: Surface Reservoir Dynamics in Friction Interfaces (2019).

⁸² Sachse, H.: Untersuchungen zu Messmethoden für bremseninduzierte Emissionen (2015), S. 24.

⁸³ Olofsson, U. et al.: Towards a model for the number of airborne particles (2009).

⁸⁴ Wahlström, J. et al.: Simulation of Airborne Wear Particles from Disc Brakes (2009).

Archard und greift auf einen in Tribometermessungen ermittelten Verschleißkoeffizienten zurück. Die Partikelemission wird anhand von Partikelkoeffizienten berechnet, die ebenfalls in Tribometermessungen in einem Arbeitspunkt (eine Kombination aus Flächenpressung und Geschwindigkeit) für verschiedene Partikeldurchmesser ermittelt wurden. Die berechnete und simulierte Größenverteilung während einer 6-minütigen Schleppbremsung bei niedrigem Bremsdruck zeigt gemäß Wahlström qualitativ und quantitativ große Übereinstimmung. Abweichungen zwischen den Ergebnissen führt Wahlström auf das nicht simulierte Einlaufverhalten der Reibpaarung zurück.

Ricciardi et al.⁸⁵ nutzen neuronale Netze, um die in Realfahrzeugversuchen gemessenen Partikelanzahlemissionen zwischen 23 nm und 2,5 µm zu beschreiben und anschließend vorherzusagen. Die kumulative Abweichung der Partikelanzahl pro Zyklus liegt zwischen 3,95 % und 32,68 % je nach verwendetem neuronalen Netz. Pro Einzelbremsung liegt die Abweichung zwischen Messung und Vorhersage bei einem Faktor von 1/30 bis 5.

Der Stand der Forschung beschreibt zusammenfassend die Vermessung von Emissionskennfeldern auf Pin-On-Disc Tribometern und deren Verwendung als Materialparameter bzw. Eingangsgröße in einem FEM-Simulationsmodell. Mit dieser Methode wurde der 6-minütige stationäre Betrieb einer Bremse in einem Druck-Geschwindigkeits-Arbeitspunkt simuliert. Andere Autoren verwenden neuronale Netzwerke, um Partikelanzahlemissionen in Fahrzeugversuchen vorherzusagen. Basierend auf diesem Forschungsstand bestehen folgende, unbeantwortete Forschungsfragen:

1. Wie lassen sich aus gemessenen PM_{10} -Emissionskennfelder für Pkw-Bremsen valide Vorhersagen von PM_{10} -Emissionen in Fahrzyklen ableiten?
2. Im Rahmen welcher Genauigkeit sind Vorhersagen mit diesen Kennfeldern möglich und welche Limitierungen weisen sie auf?

3.3 Fazit zum Stand der Forschung

Der aktuelle Stand der Forschung umfasst Erkenntnisse bezüglich der Partikelanzahl- sowie Partikelmassenemission in Abhängigkeit der Einflussgrößen Brems Scheibentemperatur, Bremsdruck bzw. Flächenpressung, Geschwindigkeit und Reibhistorie. Die Erkenntnisse basieren auf Beobachtungen aus Tribometer- und Schwungmassenprüfstandsversuchen. Abbildung 7 fasst die zentralen Erkenntnisse des aktuellen Forschungsstandes entsprechend der Gliederung in Einflussgrößen, Versuchsaufbau, abhängige Größen und Erkenntnisse stichpunktartig zusammen.

Während aus Tribometerversuchen sowohl Erkenntnisse über die Partikelanzahl- als auch die Partikelmassenemission in Abhängigkeit der Temperatur vorliegen, konnte in Schwungmassenprüfstandsversuchen bisher lediglich die Temperaturabhängigkeit der

⁸⁵ Ricciardi et al.: Artificial neural network regression models for the prediction of brake emission (2020)

Partikelanzahlemission quantifiziert werden. Mehrere Autoren berichten übereinstimmend von einer kritischen Temperatur, oberhalb derer ein sprunghafter Anstieg der Partikelemission auftritt. Als Ursprung dieses Phänomens werden thermische Zersetzungsprozesse der organischen Belagmaterialien diskutiert. Inwiefern diese Zersetzungsprozesse durch Verwendung anderer Reibmaterialien wie z.B. anorganischer Bindemittel vermieden werden können und inwiefern die Zersetzungsprozesse sich auf die Emission der Partikelmasse auswirken, ist unbekannt.

Neben Erkenntnissen zum Effekt der Scheibentemperatur enthält der Stand der Forschung ebenfalls Erkenntnisse bezüglich der Einflussgrößen Flächenpressung und Geschwindigkeit in Tribometerversuchen. Diese Erkenntnisse liegen in Form von Emissionskennfeldern vor und deuten darauf hin, dass grobe und feine Partikel (relevant für die Partikelmasse) von der Reibgeschwindigkeit abhängen, während ultrafeine Partikelemissionen (relevant für die Partikelanzahl) im Wesentlichen durch hohe Temperaturen hervorgerufen werden. Es verbleibt die Frage, inwiefern sich Bremsdruck und Geschwindigkeit in Schwungmassenprüfstandsversuchen quantitativ auf die Partikelmassen- und Partikelanzahlemission auswirken.

Im Stand der Forschung wird der Effekt der Geschwindigkeit auf die Partikelmassenemission ebenfalls für den Sonderfall der nicht betätigten Bremse ($p=0$) gesondert diskutiert. Bei nicht betätigter Bremse treten beim Beschleunigen und Rollen sogenannte Off-Brake-Emissionen auf. Als Ursache hierfür wird das Restschleifmoment diskutiert. Ein Beweis hierfür steht aus. Es ist zudem nicht bekannt, ob und wie Off-Brake-Emissionen vermieden werden können. Dementsprechend ist ebenfalls die Fragestellung unbeantwortet, ob und inwiefern eine mögliche Vermeidung oder Verringerung von Off-Brake-Emissionen zur Reduzierung von Emissionsfaktoren in Fahrzyklen beitragen würde.

Aus dem Stand der Forschung sind zeitvariante Effekte bezüglich des Reibwertes zwischen Bremsbelag- und Scheibe und ein ebenfalls dynamisches Verhalten der Oberflächentopographie bekannt. Der Reibwert wirkt sich über das Reibmoment linear auf die verrichtete Reibarbeit aus. Diese wiederum wirkt sich nach klassischen Verschleißmodellen linear auf den Massenverschleiß aus. Da Bremspartikelemissionen unter anderem durch Verschleiß der Reibpartner verursacht werden, leitet sich die Frage ab, ob das zeitvariante Verhalten des Reibwertes sich ebenfalls auf die Partikelmassen- oder Partikelanzahlemission auswirkt. Beobachtungen in der Literatur zeigen, dass die zeitaufgelöste maximale Partikelanzahlkonzentration pro Bremsung nach Bremsdruckänderungen ein zeitvariantes Verhalten aufweist. Dies wirft die Frage auf, ob ebenfalls die emittierte Gesamtanzahl oder emittierte Masse pro Bremsung nach Druck- oder Geschwindigkeitsänderungen ein zeitvariantes Verhalten aufweist und in welchem quantitativen Umfang dieses auftritt.

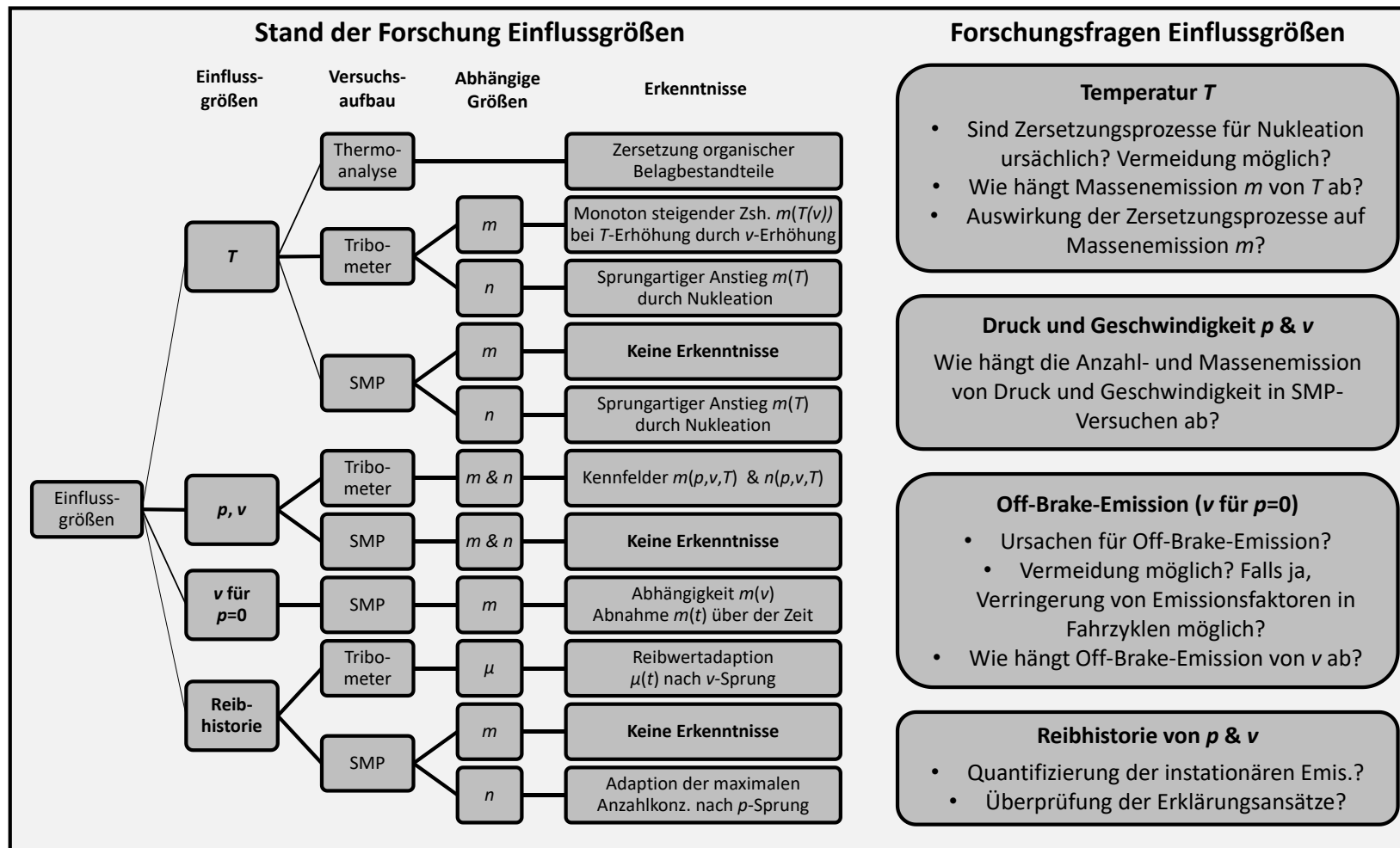


Abbildung 7: Links: Übersicht über den Stand der Forschung bezüglich der Einflussgrößen Temperatur T , Druck p , Geschwindigkeit v und Reibhistorie auf die Emission von Partikelmasse m und anzahl n . Rechts: Forschungsbedarf in Form von Forschungsfragen

Nach aktuellem Stand der Forschung liegen drei Modelle zur Vorhersage von Bremspartikelemissionen vor. Eine Übersicht über diesen aktuellen Forschungsstand ist grafisch in Abbildung 8 dargestellt. Zwei Modelle basieren auf empirischen Partikelkoeffizienten, die abhängig von der Normalkraft vermessen werden und linear die Partikelemission beeinflussen. Ein weiteres Modell basiert auf neuronalen Netzen, deren Trainingsdaten mit Realfahrzeugversuchen in Fahrzyklen ermittelt werden und die anschließend die Partikelanzahlemission zwischen 23 nm und 2,5 µm für Realfahrzeugversuche in Fahrzyklen vorhersagen. Der aktuelle Stand der Forschung enthält keine Erkenntnisse darüber, inwiefern sich mit PM_{10} -Emissionskennfeldern aus Schwungmassenprüfstandsversuchen valide Vorhersage der PM_{10} -Emissionen in Fahrzyklen ableiten lassen und mit welcher Genauigkeit Vorhersagen mit diesen Kennfeldern möglich sind.

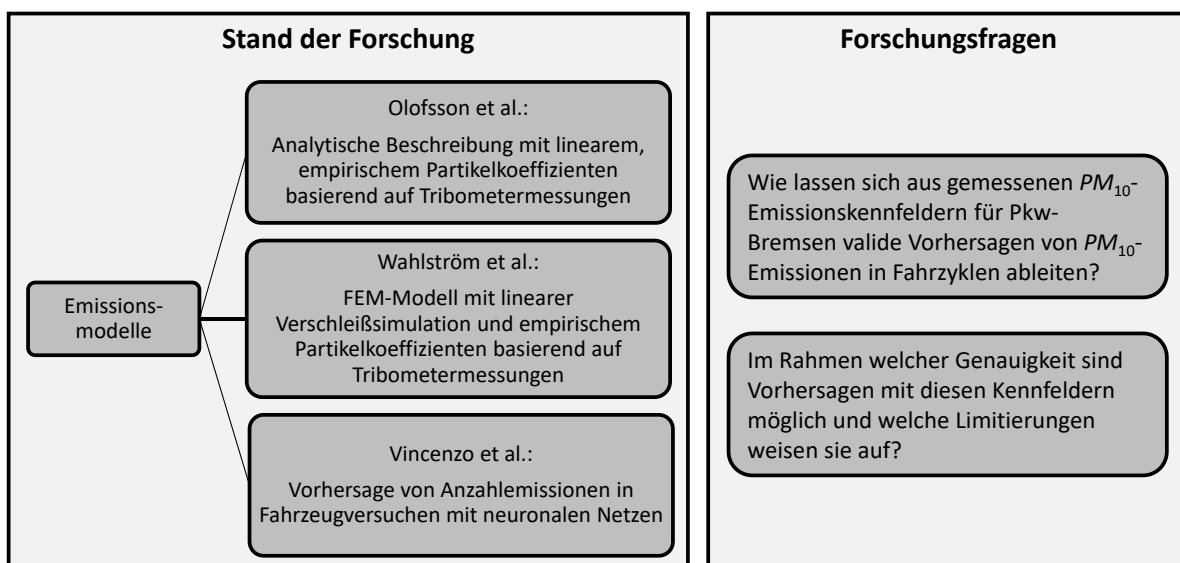


Abbildung 8: Links: Übersicht über den Stand der Forschung bezüglich Emissionsmodellen für die Vorhersage von Bremspartikelemissionen. Rechts: Forschungsbedarf für die Vorhersage von Bremspartikelemissionen in Form von bisher unbeantworteten Forschungsfragen

4 Untersuchungsmethodik

Das vorliegende Kapitel beschreibt die Methodik, die zur Untersuchung der im vorangegangenen Kapitel aufgezeigten Forschungsfragen Anwendung findet. Neben der Ableitung Definition der Messgrößen und einer Beschreibung des Versuchsaufbaus besteht die Methodik zudem aus Versuchsvorschriften zur Identifikation der oben beschriebenen Einflussgrößen Temperatur, Druck, Bremsgeschwindigkeit, Rollgeschwindigkeit und Reibhistorie.

4.1 Definition der Messgrößen

Der aktuelle Arbeitsstand zur geplanten gesetzlichen Reglementierung von Bremspartikelemissionen sieht die Partikelanzahl- und Partikelmassenemission als zu reglementierende Größen vor⁸⁶. Die Beschreibung des Partikelemissionsverhalten erfolgt in der vorliegenden Arbeit daher auf Grundlage dieser beiden Größen. Um eine detaillierte Beschreibung des Emissionsverhaltens zu ermöglichen werden neben kumulativen Anzahl- und Massenemissionsfaktoren, wie sie die Regulierung vorsieht, zusätzlich zeit aufgelöste Emissionskennwerte herangezogen.

Eine zentrale Größe zur Beschreibung von Aerosolen sind Partikelkonzentrationen in einem Messvolumen⁸⁷. Entsprechend der oben genannten gesetzlichen Anforderung werden im Folgenden die beiden Messgrößen Anzahlkonzentration N und Massenkonzentration M verwendet, die als Quotient aus Partikelanzahl n bzw. Partikelmasse m pro Aerosolvolumen V definiert sind:

$$N = n_p / V_{\text{Aerosol}} \quad 4.1$$

$$M = m_p / V_{\text{Aerosol}} \quad 4.2$$

Die im Rahmen dieser Arbeit messtechnisch erfassten Konzentrationen liegen als Mittelwerte über die Abtastintervalle ($t=1$ s) der Echtzeitmessgeräte vor. Basierend auf diesen Mittelwerten ist die Anzahl- bzw. Massenemissionsrate wie folgt definiert

$$\dot{n}_p = \frac{dn_p}{dt} = \frac{d N V_{\text{Aerosol}}}{dt} \quad 4.3$$

$$\dot{m}_p = \frac{dm_p}{dt} = \frac{d M V_{\text{Aerosol}}}{dt} \quad 4.4$$

⁸⁶ Grigoratos, T.: Workshop – Towards a regulation on brake wear emissions (2021).

⁸⁷ Baron, P. A. et al.: Aerosol measurement (2011), S. 7.

Für die Bewertung der Emission während gesamter Fahrzyklen sowie für die Analyse von Einflussgrößen in Einzelbremsungen (siehe Abschnitt 4.3) ist eine Berechnung kumulativer Werte über die entsprechenden Zeitintervalle erforderlich. Zur Berechnung kumulativer Werte über Fahrzyklen oder einzelne Bremsungen erfolgt die Integration der Emissionsraten über der gesamten Zykluszeit oder über der Emissionsdauer einer Bremsung.

$$n_B = \int_{t_{\text{Start},B} + t_{\text{Tot}}}^{t_{\text{End},B} + t_{\text{Tot}} + t_E} \dot{n}_p dt' \quad 4.5$$

$$m_B = \int_{t_{\text{Start},B} + t_{\text{Tot}}}^{t_{\text{End},B} + t_{\text{Tot}} + t_E} \dot{m}_p dt' \quad 4.6$$

Für ultrafeine Partikelemissionen variiert die Emissionsdauer und wird für die Partikelanzahl daher automatisiert berechnet (siehe Anhang A.1). Für die Partikelmassenemission ist der Emissionsstartzeitpunkt als Bremsbeginn plus Totzeit der Messstrecke (3 Sekunden) definiert. Der Emissionsendzeitpunkt ist analog dazu als Zeitpunkt des Bremsendes plus Totzeit der Messstrecke plus eine zusätzliche empirisch als zielführend festgelegte Emissionsdauer von 5 s definiert.

Eine der wichtigsten, charakteristischen Größen zur Beschreibung von Aerosolen ist deren Größenverteilung^{88a}. Diese ermöglicht es unter anderem Rückschlüsse auf Entstehungsmechanismen zu ziehen. Größenaufgelöste Messverfahren (wie Streulichtmessverfahren) liefern zudem Informationen über die zeitaufgelöste, größenabhängige Anzahlkonzentration und ermöglichen somit die Berechnung von zeitaufgelösten Massenkonzentrationen unter Annahme kugelförmiger Partikel mit konstanter Dichte. Eine weit verbreitete Beschreibungsweise von Größenverteilungen ist die normierte Anzahl- oder Massenkonzentration. Als Bezugsgröße zur Normierung dient dabei die Breite der jeweiligen Partikelgrößenklasse d_p oder deren Logarithmus. Für infinitesimal kleine Intervallbreiten ist diese differentielle Größenverteilung wie folgt definiert^{88b}:

$$n(d_p) = \frac{d N}{d d_p} \quad 4.7$$

$$m(d_p) = \frac{d M}{d d_p} \quad 4.8$$

$$n(d_p) = \frac{d N}{d \log(d_p)} \quad 4.9$$

$$m(d_p) = \frac{d M}{d \log(d_p)} \quad 4.10$$

Der Bezug auf den Logarithmus der Klassenbreite anstelle der linearen Klassenbreite ist in vielen Anwendungsfällen zweckmäßig, da Aerosole zum einen oftmals logarithmisch normalverteilt sind und sich der entsprechende Wertebereich somit über mehrere Größen-

⁸⁸ Baron, P. A. et al.: Aerosol measurement (2011), (a) S. 7 | (b) S. 42.

ordnungen erstreckt. Zum anderen sind messtechnisch gebräuchliche Kanalgrößen oftmals logarithmisch angeordnet, wodurch sich der Nenner in Gleichung 4.9 und 4.10 zu einem für das Messgerät konstanten Wert vereinfacht.

4.2 Versuchsaufbau

Die Versuche zur Erfassung der oben genannten Messgrößen erfolgten auf einem vom Institut für Energie- und Umwelttechnik (IUTA e.V.) entwickelten und zuvor veröffentlichten⁸⁹ Versuchsaufbau, im Wesentlichen bestehend aus einem Schwungmassenprüfstand (Link Model 3900 NVH) sowie einer durchströmten Einhausung der Bremse. Zum Betrieb von Pkw-Betriebsbremsen am Schwungmassenprüfstand können insbesondere Bremsgeschwindigkeit und Bremsdruck oder -moment vorgegeben werden. Axial in die Reibfläche eingebettete Thermoelemente erfassen Temperaturen unterhalb der Bremsscheibenoberfläche bzw. im Reibmaterial des Belages. Die durch die Einhausung geleitete Kühlluft durchströmt vor Einlass in die Einhausung einen HEPA-Filter der Klasse H13 und kann wahlweise durch Außenluft oder aus einem klimatisierten Umluftvolumenstrom (Lufttemperatur 20 °C, Luftfeuchtigkeit 50 %) gespeist werden. Der Kühlluftvolumenstrom von 1625 m³/h ist auf Grundlage einer CFD-Simulation dahingehend so ausgewählt, dass luftgetragene Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von ca. 40 µm zu ca. 99 % die Einhausung luftgetragen verlassen. Die Mindestanforderung zur Messung von einem aerodynamischen Durchmesser von 10 µm wäre gemäß den Modellrechnungen bereits bei einem Volumenstrom von ca. 500 m³/h erfüllt. Am Auslass der Kammer erfolgt eine isokinetische Probenahme mittels eines geregelten Volumenstroms von 2,3 m³/h, der anschließend durch einen *PM*₁₀-Impaktor gemäß (Modell SH 10-47, Comde-Derenda GmbH, Stahnsdorf, Deutschland) geleitet wird. Stromabwärts erfolgen weitere isokinetische Probenahmen zur Speisung dreier Echtzeitmessgeräte sowie einer gravimetrischen Filtermessung. Die Echtzeit-Partikelmessstechnik umfasst einen Fast Mobility Particle Sizer (FMPS, Model 3091, TSI Inc. Shoreview, MN, USA), um die Anzahlgrößenverteilung der emittierten Partikel im Partikelgrößenbereich zwischen 5,6–560 nm anhand der elektrischen Mobilität der Partikel zu bestimmen. Die Anzahlgrößenverteilung im Größenbereich von 0,3–10 µm (optischer Streulichtdurchmesser) erfasst ein optischer Partikelgrößenzähler (OPS, Model 3330, TSI Inc.). Ein zusätzlicher Kondensationspartikelzähler (CPC, Model 3776, TSI Inc.) bestimmt die Anzahlkonzentration der emittierten Partikel bis zu einer minimalen Größe von 2,5 nm. Die Datenerfassung aller Echtzeit-Partikelmessgeräte erfolgt mit einer Abtastrate von 1 Hz und ist zeitlich synchronisiert mit der Messdatenerfassung des Schwungmassenprüfstandes. Das zeitliche Auflösungsvermögen der gesamten Messstrecke ist Gegenstand der Systemidentifikation in Kapitel 5.

⁸⁹ Nach Asbach, C. et al.: Entstehung und Messung von Feinstaub beim Bremsen (2018), S. 56.

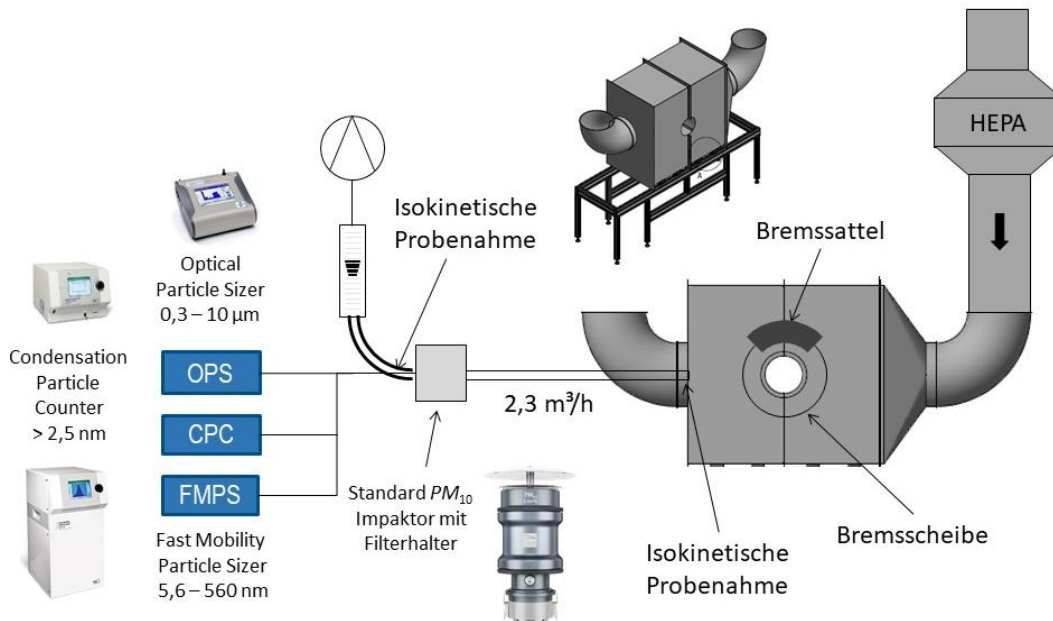


Abbildung 9: Experimenteller Versuchsaufbau zur Vermessung der Feinstaubemissionen einer Pkw-Betriebsbremse mittels eines Schwungmassenprüfstandes⁹⁰

4.3 Versuchsmethodik

Im folgenden Abschnitt werden Versuchspläne zur Beantwortung der im Stand der Forschung aufgezeigten Forschungsfragen entwickelt. Aus den Forschungsfragen ergeben sich Anforderungen an die Experimente. Diese Anforderungen sind Ausgangspunkt für die Entwicklung von Versuchsdesigns. Aus den Anforderungen ergeben sich zudem Zielkonflikte für das Versuchsdesign, die nachfolgend gemeinsam mit Lösungsansätzen sowie deren Eignung diskutiert werden.

4.3.1 Bremsscheibentemperatur

Das Ziel dieser Untersuchung ist die Beantwortung der in Abschnitt 3.1.1 abgeleiteten Forschungsfragen und somit die Quantifizierung der Abhängigkeit der Partikelanzahlemissionen von der Scheibentemperatur $n(T_S)$ und der Abhängigkeit der Partikelmassenemission von der Scheibentemperatur $m(T_S)$. Aus dem Stand der Forschung ist die Existenz einer kritischen Scheibentemperatur bezüglich der Abhängigkeit $n(T_S)$ bekannt, die möglicherweise durch Zersetzungsprozesse von organischen Belagmaterialien verursacht wird. Daraus leitet sich die Frage ab, ob diese kritische Temperatur ebenfalls die Abhängigkeit der Partikelmassenemission von der Temperatur $m(T_S)$ beeinflusst. Eine weitere Fragestellung lautet, ob die kritische Temperatur durch gezielte Variation der

⁹⁰ Asbach, C. et al.: Entstehung und Messung von Feinstaub beim Bremsen (2018).

Belagmaterialien beeinflusst werden kann. Es bestehen folgende Anforderungen an den Versuchsplan, die nachfolgend gemeinsam mit Zielkonflikten für die Entwicklung des Versuchsdesigns und Lösungsansätzen aufgelistet sind:

- Möglichst unabhängige Variation der Scheibentemperatur von anderen Einflussgrößen oder die Möglichkeit zur begründeten Abschätzung möglicher Interaktionseffekte wie z.B. des zeitvarianten Verhaltens durch Reibhistorieneffekte oder Interaktionseffekte mit Druck und Geschwindigkeit
- Berücksichtigung der kritischen Temperatur im Sinne der gezielten Überschreitung oder gezielten Vermeidung dieser Temperatur, um das Emissionsverhalten empirisch über- und unterhalb der kritischen Temperatur zu beschreiben. Hierin besteht ein Zielkonflikt. Eine mögliche Auflösung dieses Konfliktes ist die Aufteilung der Untersuchung in zwei unabhängige Versuche.
- Ermöglichen einer Aussage über die Reproduzierbarkeit von Partikelanzahl- und Partikelmassenemissionen ober- und unterhalb der kritischen Temperatur oder Identifizierung von möglichen Reihenfolgeeffekten. Aus der Forderung nach einer Aussage bezüglich Reproduzierbarkeit bzw. Interaktion mit Reihenfolgeeffekten leitet sich der Bedarf nach einer hohen Wiederholungszahl ab. Diese steht im Zielkonflikt mit der Versuchsökonomie.
- Explorative Untersuchung von Ansätzen zur Beeinflussung der kritischen Temperatur (z.B. durch Substitution organischer Bestandteile des Belages)
- Wahl von Druck-Geschwindigkeitsarbeitspunkten, die eine ausreichend hohe Reibenergie zur Erhöhung der Temperatur ermöglichen und zugleich keinen zu schnellen Temperaturanstieg bewirken

Nachfolgend wird eine Versuchsmethodik vorgestellt, die aus den oben genannten Anforderungen abgeleitet ist. Der Effekt der Temperatur auf das Emissionsverhalten von ultrafeinen Partikeln wird darin mittels Temperaturdreiecken bzw. -pyramiden untersucht, die Inhalt einer vorangegangenen Publikation sind⁹³. Dies erfolgt in einem Druck-Geschwindigkeits-Betriebspunkt der Bremse ($p = 20$ bar; $v = 80$ km/h) mit zeitgesteuerten Schleppbremsungen ($t = 6$ s) zur schrittweisen Erhöhung und Absenkung der integralen Scheibentemperatur zwischen 75 °C und 250 °C . Die Geschwindigkeit ist in diesem Zusammenhang die fiktive Radumlaufgeschwindigkeit, die sich im Schwungmassenprüfstandsversuch aus dem Produkt der Winkelgeschwindigkeit der Bremse und dem fiktiven Radradius berechnet. Um statistische Streuungen zu verringern und den Effekt von Adaptions- oder thermischen Alterungsprozessen abzuschätzen, werden pro Temperaturschritt fünf Schleppbremsungen durchgeführt. Die integrale Scheibentemperaturmessung erfolgt mit einem Thermoelement, das axial in den inneren Reibring an einer radial zentrierten Position ca. $0,1\text{ mm}$ unterhalb der Reibfläche positioniert ist. Zur Beein-

⁹³ Nach Niemann, H. et al.: Influence of Disc Temperature on Particle Emissions (2020), S. 5.

flussung der kritischen Temperatur bietet es sich an, die organischen Belagbestandteile mit der niedrigsten Zersetzungstemperatur zu ersetzen. Aus dem Stand der Forschung ist bekannt, dass organische Belagbindemittel die niedrigste Zersetzungstemperatur der Belagmaterialien aufweisen. Als Reibmaterialien werden daher neben konventionellen ECE-Belägen mit organischen Belagbindemitteln auch prototypische Beläge mit anorganischen Belagbindemitteln verwendet.

Die Untersuchung des Effektes der Temperatur auf die PM_{10} -Emissionen gliedert sich in zwei Teile. Der erste Teil untersucht das Emissionsverhalten im Temperaturbereich unterhalb und oberhalb der kritischen Temperatur, um mögliche Änderungen der PM_{10} -Emissionsrate oberhalb der kritischen Temperatur zu identifizieren. Der Versuchsablauf ist identisch mit den zuvor beschriebenen Temperaturdreiecken.

In einem zweiten Schritt wird die PM_{10} -Emissionsrate unterhalb der zuvor identifizierten Übergangstemperatur mit einem ähnlichen, aber erweiterten Dreiecksversuchssignal mit mehreren Dreiecken untersucht. In diesem Fall umfasst der Versuch nicht lediglich einzelne Temperaturdreiecke, sondern sieben Dreieckspaare mit einer wechselnden Anzahl von Temperaturstufen gemäß Abbildung 10. Der Ansatz der Untersuchung besteht hierbei in der Analyse der Reproduzierbarkeit unterhalb der kritischen Temperatur. Mögliche Wechselwirkungen zwischen Temperatur, Bremsdruck und Geschwindigkeit werden dahingehend untersucht, dass vier verschiedene Drehmoment-Geschwindigkeits-Betriebspunkte mit gleicher Reibleistung verwendet werden (siehe Tabelle 1). Diese Drehmoment-Geschwindigkeits-Betriebspunkte werden paarweise in der Kombination 1&4 und 2&3 während eines Dreieckstests so angefahren, dass drei aufeinander folgende Wiederholungen jedes Betriebspunktes bei einem Temperaturschritt durchgeführt werden. Folglich besteht ein Temperaturschritt aus $2 \cdot 3 = 6$ Schleppbremsungen, die ebenfalls zeitgesteuert, aber mit einer kürzeren Bremsdauer von $t = 4$ s erfolgen.

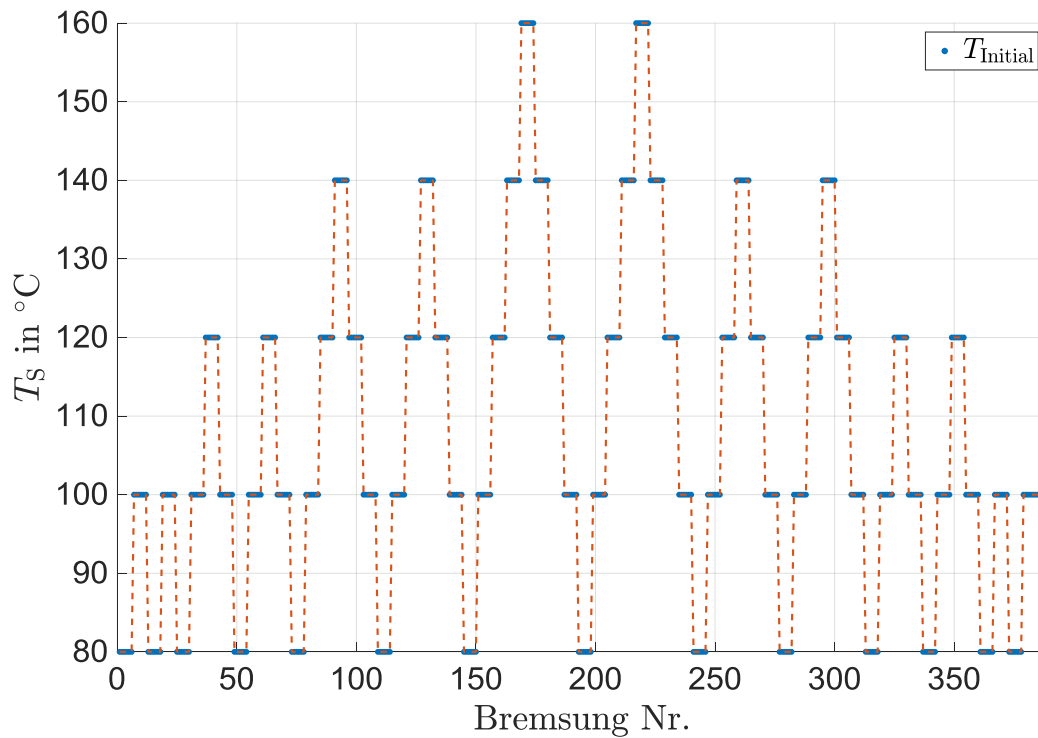


Abbildung 10: Mehrstufige Temperaturdreiecke zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit des gemessenen Temperatureinflusses unterhalb der kritischen Temperatur.

Tabelle 1: Drehmoment-Geschwindigkeitsarbeitspunkte für mehrstufige Temperaturdreiecke

Betriebspunkt	θ in Nm	v in km/h
1	1120	50
2	753	74
3	568	98
4	455	123

4.3.2 Betriebshistorie

Das aus den in Abschnitt 3.1.4 beschriebenen Forschungsfragen abgeleitete Ziel ist die systematische Quantifizierung der Abhängigkeit der Partikelemission von Druck- und Geschwindigkeits-Betriebshistorie. Die Anforderungen an die Experimente zur Erreichung dieses Ziels sowie die damit einhergehenden Zielkonflikte für das Versuchsdesign sind:

- Möglichst unabhängige Variation der Druck- und Geschwindigkeitshistorie, z.B. durch Steuerung direkter Einflussgrößen wie der Scheibentemperatur.
- Ermöglichen einer Aussage über die Existenz von Reibhistorieneffekten (z.B. durch Screening-Methoden)

- Ermöglichen einer Aussage über den quantitativen Effekt von Reibhistorieneffekten über der Bremszeit
- Generierung einer empirischen Datengrundlage als Ausgangspunkt für die Diskussion möglicher Erklärungsansätze
- Wahl der Reibhistorie (im Sinne von Druck und Geschwindigkeit) entsprechend dem Arbeitsraum, der den realen Fahrbetrieb (z.B. WLTP) abbildet. Dies steht im Zielkonflikt mit dem Bedarf nach möglichst großen beobachtbaren Effekten, die ggf. erst bei höheren Druck- oder Geschwindigkeitsdifferenzen auftreten.
- Forderung nach Reproduzierbarkeit und Abdeckung des gesamten relevanten Arbeitsraumes. Zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit von Reibhistorieneffekten und zum Screening des Arbeitsraumes ist eine einstufige Variation der Reibhistorie zielführend. Eine mehrstufige Variation der Reibhistorie ist hingegen hinsichtlich einer detaillierten quantitativen Beschreibung zielführend. Ein Ansatz zur Lösung des hieraus resultierenden Zielkonfliktes ist die Aufteilung des Experiments in einen Teil zur einstufigen Variation und einen Teil zur mehrstufigen Variation.
- Wahl der Referenzbelastung (im Sinne von Druck und Geschwindigkeit) entsprechend eines für den realen Fahrbetrieb (z.B. WLTP) repräsentativen Arbeitspunktes. Eine Variation der Referenzbelastung ist im Sinne der Überprüfung einer möglichen Allgemeingültigkeit beobachteter Effekte zielführend, um die Übertragbarkeit der beobachteten Reibhistorieneffekte auf verschiedene Referenzarbeitspunkte zu überprüfen. Sie steht jedoch ebenfalls im Zielkonflikt mit der Versuchsökonomie.
- Wahl ausreichend langer Bremszeiten in einem Arbeitspunkt, um eine Abschätzung zu ermöglichen, ob ein stationärer Emissionszustand erreicht wurde. Diese Anforderung steht im Zielkonflikt mit der praktisch verfügbaren Prüfstandszeit.

Diese Anforderungen sind Ausgangspunkt für die Ableitung der nachfolgend beschriebenen Untersuchungsmethoden, die Gegenstand zweier vorheriger Veröffentlichungen des Autors sind^{94 95}. Die erste Methode ist ein vollfaktorieller Versuchsplan, der acht Druck-Geschwindigkeitsarbeitspunkte und einen Referenzpunkt abdeckt. Der Ansatz des Versuchs besteht entsprechend der Anforderung nach unabhängiger Variation der Reibhistorie darin, Partikelemissionen während Schleppbremsungen im Referenzpunkt in Abhängigkeit der acht variablen Vorgängerarbeitspunkte zu quantifizieren. Durch die vollfaktorielle Auslegung des Versuchs ermöglicht das Experiment sowohl auf die Identifizierung von Haupt- als auch von Interaktionseffekten der beiden Einflussgrößen Druckhistorie und Geschwindigkeitshistorie. Hierzu erfolgen n Schleppbremsungen in einem der Arbeitspunkte und anschließend n Schleppbremsungen im Referenzpunkt. Somit ergibt sich eine Versuchsrei-

⁹⁴ Nach Niemann, H. et al.: Untersuchung des Partikelemissionsverhaltens von Scheibenbremsen (2019).

⁹⁵ Nach Niemann, H. et al.: Map based simulation of brake wear particle emissions (2020).

henfolge, die den in Abbildung 11 dargestellten Arbeitsraum sternförmig durchläuft (AP1 → Ref. → AP2 → Ref. → AP3 ...). Als Startbedingung für eine Bremsung sind 75 °C integrale Scheibentemperatur festgelegt und die Bremszeit pro Bremsung beträgt 5 s. Der untersuchte Arbeitsraum orientiert sich an den im WLTP auftretenden Arbeitspunkten.

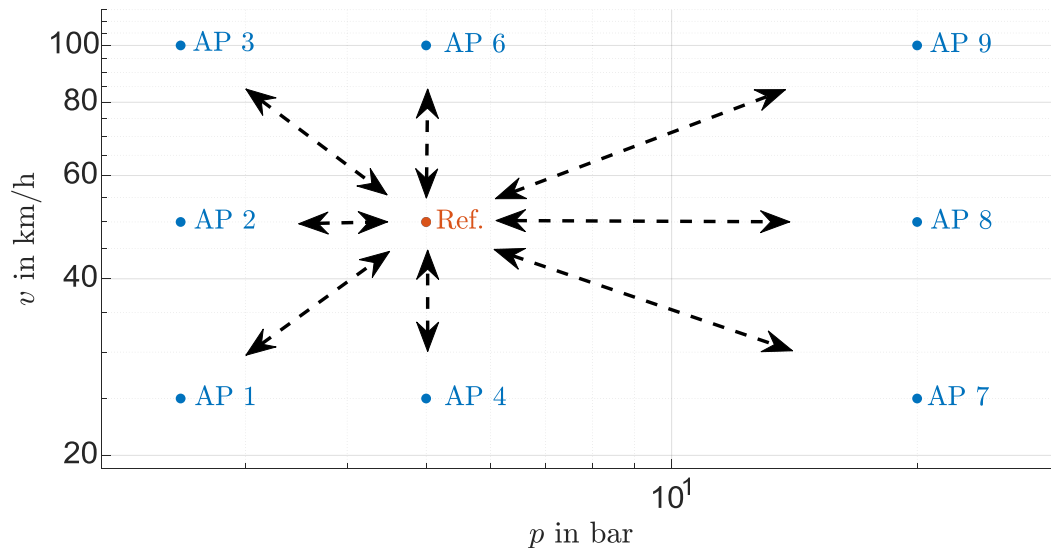


Abbildung 11: Vollfaktorieller Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses der Reibhistorie

Der zweite Teil der Untersuchungsmethodik umfasst die Einzelvariation der Druck- und Geschwindigkeitshistorie in einem exemplarischen Referenzarbeitspunkt entsprechend des Versuchsplans in Abbildung 12. Im Rahmen einer Einzelvariation können keine Interaktions-, sondern nur Haupteffekte untersucht werden, jedoch mit einer größeren Anzahl an Stichproben pro Einflussgröße. Die Versuchsparameter Bremsdauer, Starttemperatur sowie das sprungartige Durchlaufen des Arbeitsraumes (AP1 → Ref. → AP2 → Ref. → AP3 ...) sind analog zur obigen Beschreibung des vollfaktoriellen Versuchs.

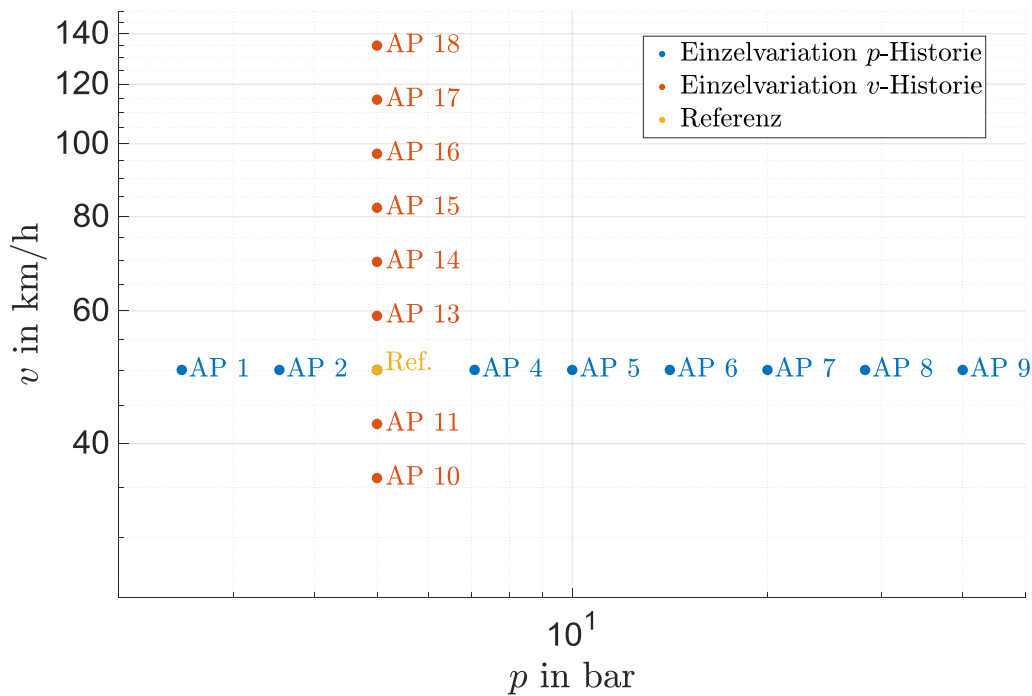


Abbildung 12: Einzelfaktorieller Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses der Reibhsitorie

4.3.3 Bremsdruck und -geschwindigkeit

Das Ziel der nachfolgenden Untersuchungsmethodik besteht entsprechend der Forschungsfragen (Abschnitt 3.1.2) darin, die Abhängigkeit der Partikelanzahl- und Partikelmassenemission von den Betriebsgrößen Bremsdruck und Geschwindigkeit zu quantifizieren. Die Anforderungen an die Untersuchungsmethodik und daraus entstehende Zielkonflikte sind:

- Generierung einer empirischen Datengrundlage als Ausgangspunkt für die simulative Vorhersage von Bremspartikelemissionen in Anhängigkeit der beiden direkten Fahrbetriebsgrößen Bremsdruck und Geschwindigkeit
- Möglichst unabhängige Variation von Bremsdruck und Geschwindigkeit durch
 - a. Vermeidung von Reihenfolgeeffekten (Reibhsitorie) oder gezieltes Zulassen von Reihenfolgeeffekten. Zielkonflikt, der durch Aufteilen des Experiments in zwei Teile gelöst werden kann.
 - b. Begrenzung der Interaktion mit anderen Betriebsgrößen wie der Scheibentemperatur (z.B. durch definierte Starttemperatur, Berücksichtigung der kritischen Temperatur, Begrenzung der maximalen Temperatur)
- Wahl der Arbeitspunkte des Versuchs entsprechend des für Realfahrbedingungen (z.B. WLTP) relevanten Arbeitsraumes
- Für eine mathematische Beschreibung des Zusammenhangs der unabhängigen und abhängigen Versuchsgrößen ist eine hohe Anzahl an Variationsstufen zielführend.

Für eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Messungen ist eine hohe Anzahl an Wiederholungen pro Variationsstufe zielführend. Unter den gegebenen zeitlichen Rahmenbedingungen besteht daher ein versuchsökonomischer Zielkonflikt hinsichtlich Diskretisierung und Reproduzierbarkeit.

Eine Untersuchungsmethodik, die den oben genannten Anforderungen entspricht, ist im Folgenden beschrieben. Die Untersuchung der Einflussgrößen Bremsdruck und Geschwindigkeit besteht aus zwei Experimenten, innerhalb derer Druck, Geschwindigkeit und Temperatur in Schleppbremsungen mit vorgegebener maximaler Starttemperatur $T = 80\text{ °C}$ und einer Bremszeit von $t = 8\text{ s}$ kontrolliert werden:

1. Arbeitspunkt-Wechsel-Kennfeld⁹⁶
2. Arbeitspunkt-Block-Kennfeld

Zur Erfüllung der oben genannten Anforderungen besteht der Ansatz des „Wechsel-Kennfeldes“ darin, den realen Fahrbetrieb mit wechselnden Arbeitspunkten im WLTP sowie dessen Druck- und Geschwindigkeitsarbeitsraum abzubilden. Der Ansatz des „Arbeitspunkt-Block-Kennfeldes“ ist es hingegen, gezielt Reihenfolgeeffekte im Sinne der Betriebshistorie zuzulassen und deren Auswirkungen auf das Emissionsverhalten zu beschreiben. Die Kennfeldexperimente weisen folgende Versuchsparameter auf

1. **„AP-Wechsel-Kennfeld“:**
 - a. Kennfeld mit 25 Arbeitspunkten
 - b. Die Arbeitspunkte werden abwechselnd in einer einmalig per Zufall festgelegten Reihenfolge angefahren.
 - c. 100 Wiederholungen pro Arbeitspunkt
 - d. Druck- und Geschwindigkeitsbereich über den gesamten für den WLTP relevanten Geschwindigkeitsbereich.
2. **„AP-Block-Kennfeld“:**
 - a. Kennfeld mit 16 Arbeitspunkten
 - b. 35 Wiederholungsbremsungen werden hintereinander in einem Arbeitspunkt durchgeführt
 - c. Beim Wechsel von einem Arbeitspunkt zu einem anderen wird entweder nur der Bremsdruck oder nur die Geschwindigkeit variiert.
 - d. Geschwindigkeitsbereich bis maximal 70 km/h, um außerhalb des Koinzidenzbereichs ($< 3000\text{ cm}^{-3}$) des OPS zu messen

⁹⁶ Nach Niemann, H. et al.: Map based simulation of brake wear particle emissions (2020).

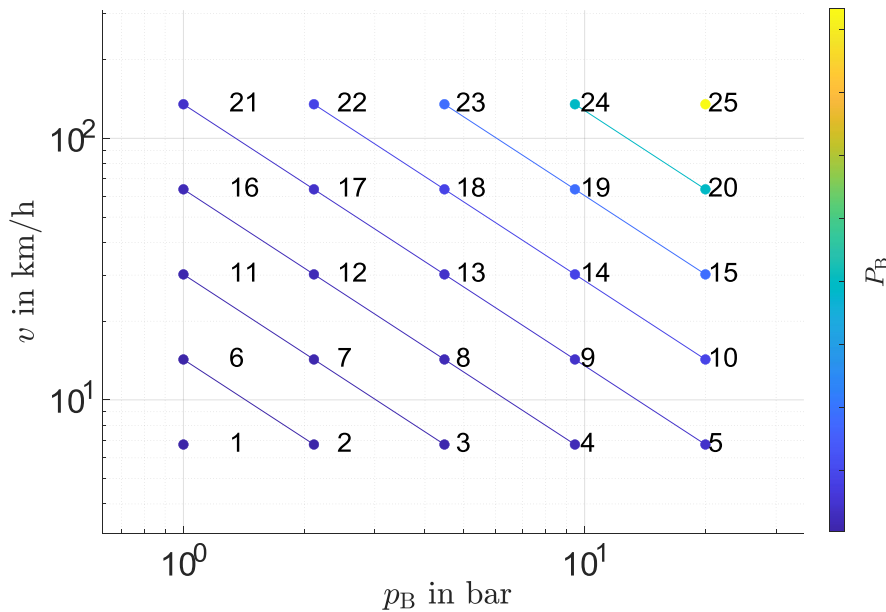


Abbildung 13: Versuchsplan zur Vermessung des Druck- und Geschwindigkeitseinflusses, bestehend aus 25 Arbeitspunkten, die auf Linien konstanter Reibleistung gruppiert sind.

4.3.4 Einflussgrößen bei nicht betätigter Bremse

Aus dem Stand der Forschung (Abschnitt 3.1.3) wurde die Fragestellung abgeleitet, welcher Mechanismus für das Phänomen der Off-Brake-Emission ursächlich ist und ob bzw. wie Off-Brake-Emissionen vermieden werden können. Da Restschleifmomente und die Durchströmung des Luftspaltes zwischen Belag und Scheibe als ursächlicher Mechanismus für Off-Brake-Emissionen im Stand der Forschung diskutiert werden, besteht der Ansatz der folgenden Untersuchungsmethodik darin, Restschleifmomente zu vermeiden und zudem die Größe des Luftspaltes zu variieren. Der Versuchsaufbau zur Erfüllung dieser Anforderung ist nachfolgend beschrieben.

Dieser zuvor publizierte Versuchsaufbau⁹⁷ für die Belagrückstellung und die Einstellung des Luftspaltes besteht im Wesentlichen aus einem Rahmen, der am Achsschenkel montiert wird, vier Feingewindestangen (M6x0,5), die in die Rückenplatte der Beläge eingeschraubt sind, vier Druckfedern, die die Rückstellkraft ausüben, sowie vier Muttern, die auf die Gewindestangen geschraubt werden. Die Muttern wirken als mechanische Anschläge für die Rückzugsbewegung der Stangen. Durch Positionierung dieser Anschlagmutter kann die Luftspaltbreite zwischen Scheibe und Belag eingestellt werden. Abbildung 14 ist eine Draufsicht auf den Aufbau mit demontiertem Bremsattel. Der Luftspalt weist in Abbildung 14 exemplarisch einen sehr großen Wert von ca. 10 mm auf, um die Funktionalität des Aufbaus zu veranschaulichen.

⁹⁷ Nach Niemann, H. et al.: Influence of pad retraction and air gap width on PM10 wear emissions (2021).

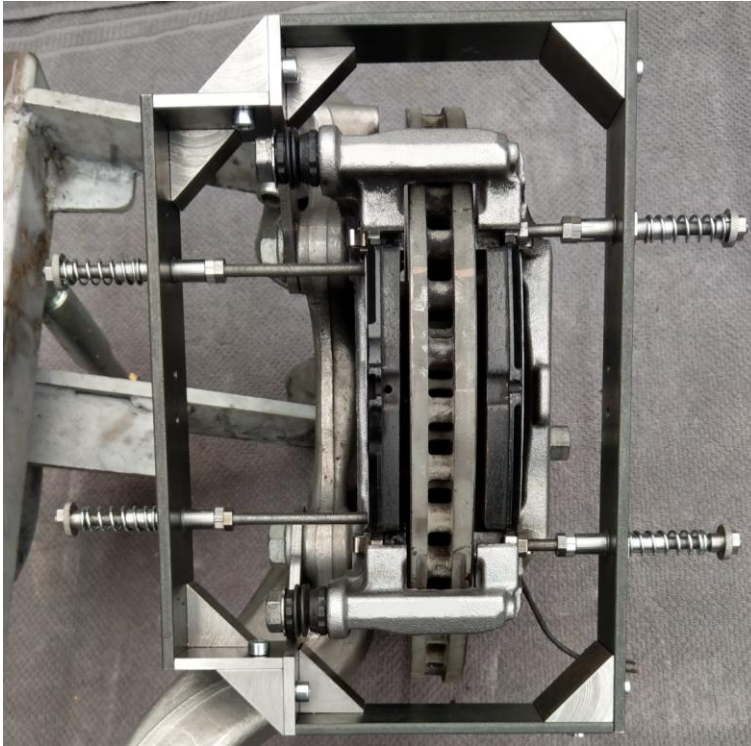


Abbildung 14: Versuchsaufbau zur Belagrückstellung und zur Einstellung der Luftspaltbreite. Pro Belag üben zwei Federn Rückstellkräfte auf die Rückenplatten aus, um die Beläge nach dem Lösen des Bremsdrucks zurückzuziehen

Eine Detailansicht der Feingewindestangen mit Anschlagmutter und Federn ist in Abbildung 3 für eine Luftspaltbreite von ca. 2 mm bei betätigter Bremse (oberes Bild) und bei nicht betätigter Bremse (unteres Bild) dargestellt. Der Abstand der Anschlagmutter zur Hülse im oberen Bild (betätigte Bremse) ist gleich der Luftspaltbreite bei gelöstem Bremsdruck.

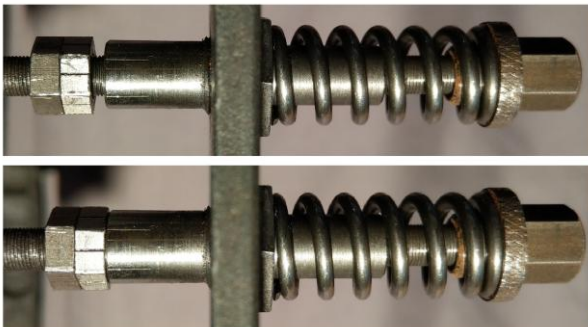


Abbildung 15: Detailansicht der Rückstellfedern und der Muttern mit Feingewinde (M6x0,5), die als mechanischer Anschlag für die Rückstellbewegung der Beläge dienen. (1/6 Mutterumdrehung $\triangleq 85 \mu\text{m}$, 2/6 Mutterumdrehung $\triangleq 170 \mu\text{m}$). Oberes Bild: On-Brake-Phase / betätigte Bremse. Unteres Bild: Off-Brake-Phase / nicht betätigte Bremse.

Der beschriebene Versuchsaufbau zur Rückstellung der Beläge wurde im Rahmen der Untersuchungen an zwei Schwimmsattelbremsen mit ECE-Belägen und Grauguss scheiben untersucht, die variable Scheibendurchmesser aufweisen (Bremse 1: 375 mm, Bremse 2: 305 mm).

5 Systemidentifikation des Versuchsaufbaus

Das Ziel der im Folgenden beschriebenen Untersuchung ist, das zeitliche Ansprechverhalten der Messstrecke zu identifizieren, das in der Emissionsmodellierung (Kapitel 8 Kennfeldbasierte Vorhersage) abgebildet wird. Die Untersuchungsmethodik zur Identifikation des zeitlichen Auflösungsvermögens der Messstrecke sowie deren Sensitivität auf Druck- und Geschwindigkeitsanregung ist in Anhang A.2 beschrieben und wurde gemeinsam mit den nachfolgenden Ergebnissen zuvor veröffentlicht⁹⁸. Das vorliegende Kapitel stellt die auf Grundlage dieser Methodik generierten Ergebnisse dar, die mittels harmonischer Druck- und Geschwindigkeitsanregung generiert wurden.

In Abbildung 16 links ist exemplarisch der Zeitverlauf einer Schleppbremsung bei 50 km/h mit einem Bremsdrucksinussignal ($\bar{p} = 5\text{bar}$, $\hat{p} = 3,1\text{bar}$, $f_p = 0,2\text{Hz}$) dargestellt. Die Antwort des Systems in Form der vom optischen Größenspektrometer (Optical Particle Sizer, kurz: OPS) mit 1 Hz gemessenen Partikelanzahlkonzentration weist ebenfalls eine Periodizität von 0,2 Hz auf, was sowohl im Zeitbereich (links) als auch insbesondere im Frequenzbereich (rechts) anhand der maximalen Ausgangssignalamplitude bei 0,2 Hz zu erkennen ist. In der Frequenzanalyse des Bremsdrucksignals wie auch des Konzentrationsignals tritt eine weitere Amplitude bei der ersten Oberwellenfrequenz von 0,4 Hz auf, die jedoch deutlich kleiner (Faktor 10) als die Amplitude bei 0,2 Hz ist. Analog zur Bremsdruckanregung ist ein exemplarischer Zeitverlauf einer Bremsung mit konstantem Druck und einem Geschwindigkeitssinussignal ($\bar{v} = 50\text{km/h}$, $\hat{v} = 10\text{km/h}$, $f_v = 0,2\text{Hz}$) in Abbildung 17 dargestellt. Im Frequenzbereich tritt ebenfalls ein Hauptmaximum der Anzahlkonzentration bei der Anregungsfrequenz von 0,2 Hz sowie ein kleineres Nebenmaximum bei 0,4 Hz auf.

⁹⁸ Nach Niemann, H. et al.: System Identification Method for Brake Particle Emission Measurements (2018).

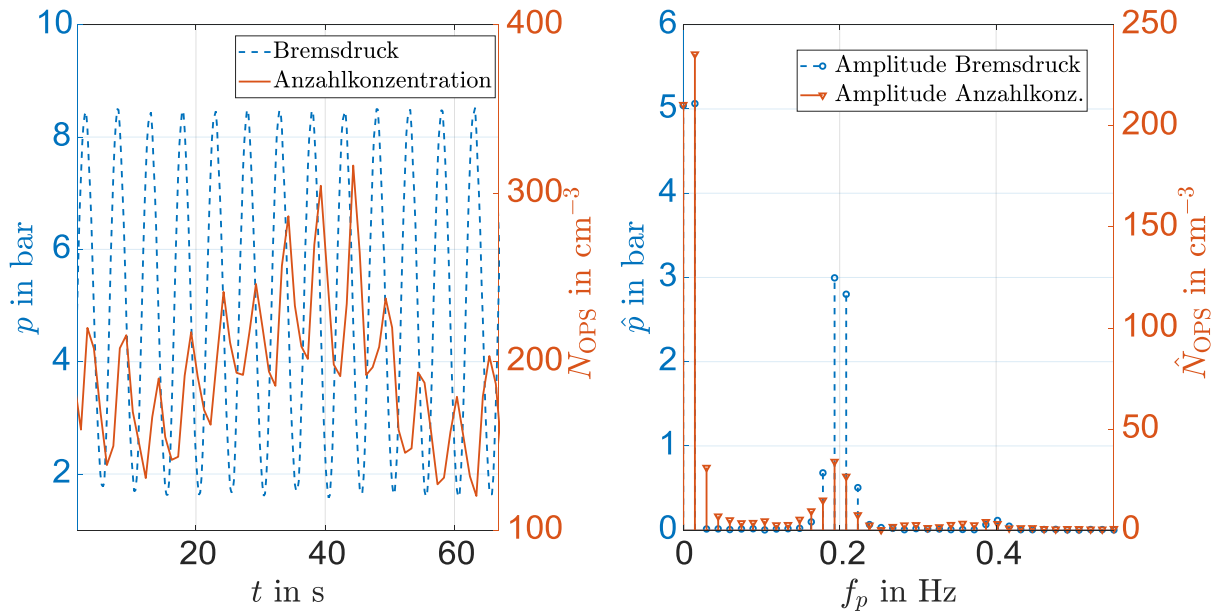


Abbildung 16: Harmonische Bremsdruckanregung mit einer Frequenz von 0,2 Hz sowie die Systemantwort in Form der vom OPS gemessenen Partikelanzahlkonzentration im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts). Spektralbildung mittels Hann-Fensterung über gesamte dargestellte Messzeit

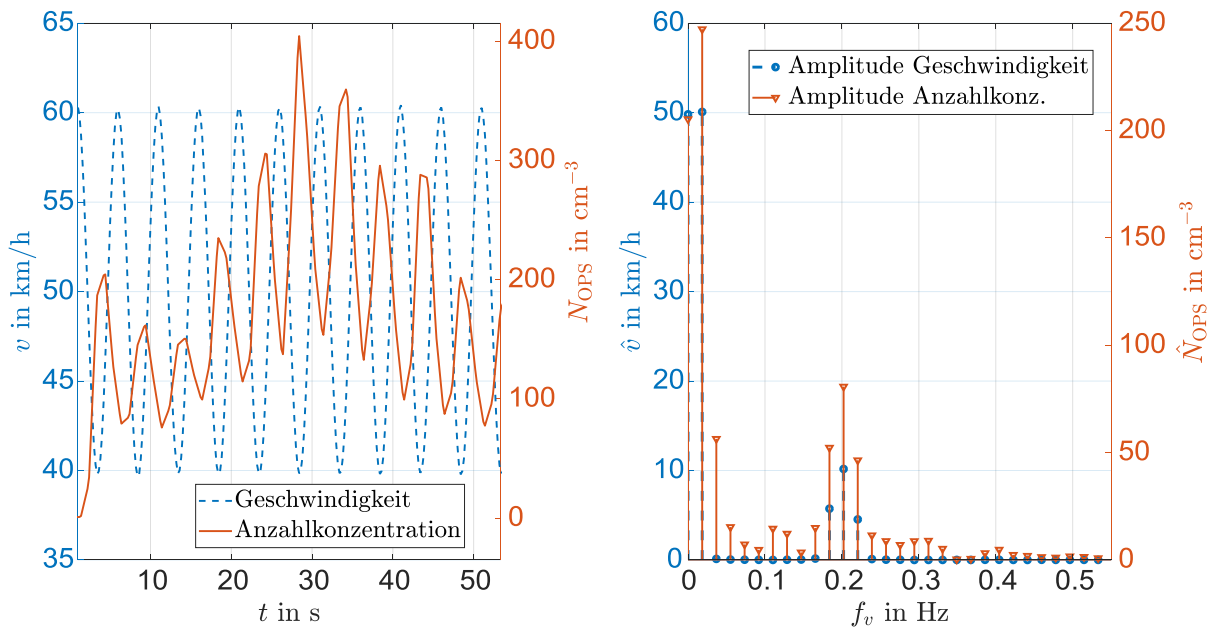


Abbildung 17: Harmonische Geschwindigkeitsanregung mit einer Frequenz von 0,2 Hz sowie die Systemantwort in Form der vom OPS gemessenen Partikelanzahlkonzentration im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts) Spektralbildung mittels Hann-Fensterung über gesamte dargestellte Messzeit

Um das zeitliche Auflösungsvermögen der gesamten Messstrecke, bestehend aus Scheibenbremse, Partikelprobeentnahme und Echtzeitmessgeräten zu bestimmen, ist in einem Zwischenschritt die Kenntnis über die minimal erforderlichen Anregungsamplituden notwendig, die eine im Frequenzbereich messbare Systemantwort hervorrufen. Die Ergebnisse der hierzu durchgeführten Variation von Druck- und Geschwindigkeitsamplitude sind in

Anhang A.3 dargestellt. Darin sind die Amplituden der vom OPS gemessenen Anzahlkonzentration über je fünf Druck- und Geschwindigkeitsamplituden aufgetragen. Pro Anregungsamplitude liegen drei bzw. fünf Wiederholungsmessungen vor. Ab einer Druckanregung von 3 bar und einer Geschwindigkeitsanregung von 5 km/h liegen alle Systemantworten oberhalb der Hintergrundamplitude und eignen sich somit für die weiterführende Untersuchung mit variabler Anregungsfrequenz. Als Hintergrundamplitude ist hierbei der Mittelwert der Ausgangssignalamplituden unter Ausschluss der Amplituden bei 0 Hz und der Anregungsfrequenz 0,2 Hz definiert.

Die Wahl der Anregungsfrequenzen ist durch zwei Grenzwerte limitiert. Eine obere Grenze der zu variierenden Frequenzen ist hierbei durch die Abtastrate der Partikelmesstechnik (1 Hz) in Kombination mit dem Shannon-Theorem zu 0,5 Hz festgelegt. Die untere Frequenzgrenze ist durch den Anstieg der Scheibentemperatur während der durchgeführten Schleppbremsungen definiert, um eine Überschreitung der kritischen Temperatur (siehe Stand der Forschung Abschnitt 3.1.1) zu vermeiden und zugleich mindestens eine vollständige Schwingungsperiode zu ermöglichen. In Abbildung 18 sind die Ergebnisse der Untersuchung mit variabler Anregungsfrequenz dargestellt. Die Systemantwort (Anzahlkonzentration des Optical Particle Sizer OPS) aus je drei Messungen ist hierzu über der Anregungsfrequenz aufgetragen. Ab einer Anregungsfrequenz von ca. 0,25 Hz weisen die Ausgangsamplituden höhere Werte als die Hintergrundamplituden auf. Dieses Ergebnis wird bei der kennfeldbasierten Modellierung in Kapitel 8 zur Parametrierung eines PT1-Gliedes aufgegriffen. In Abbildung 18 ist die für die PT1-Modellierung angenommene Grenzfrequenz grün hervorgehoben.

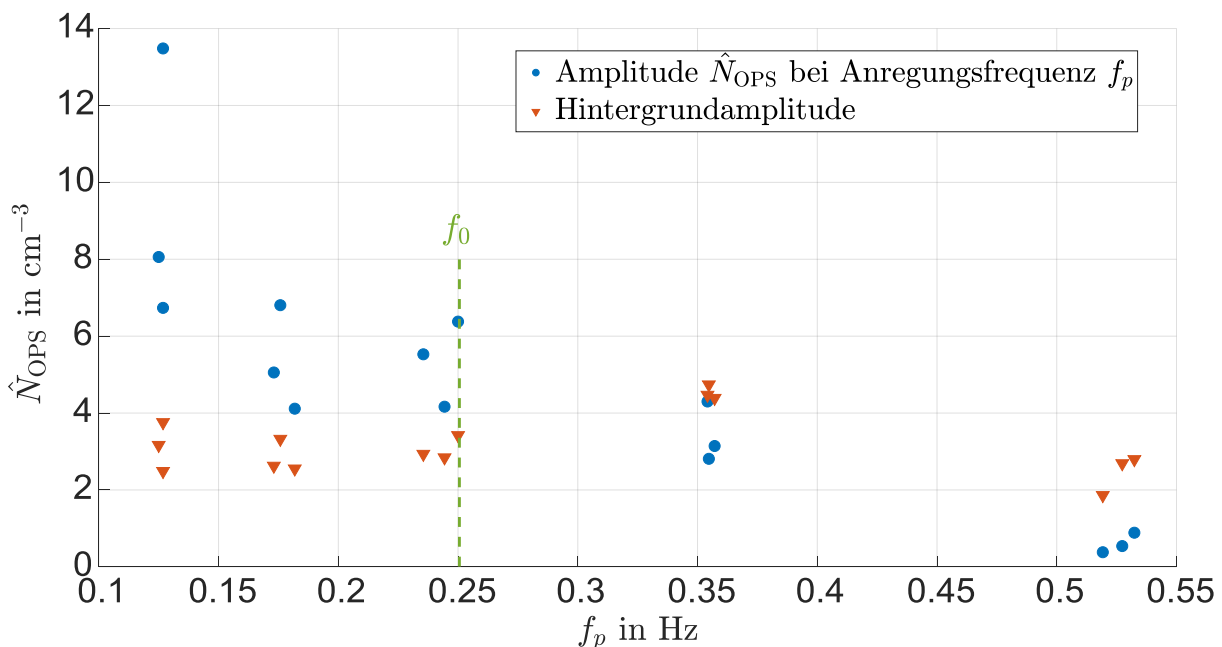


Abbildung 18: Amplitude der mit dem OPS gemessenen Anzahlkonzentration (Systemantwort) über der Bremsdruckanregungsfrequenz bei $\bar{p} = 5\text{bar}$, $\hat{p} = 3,1\text{bar}$ mit drei Wiederholungen pro Frequenz. Grün markiert ist die Frequenz von ca. 0,25 Hz, unterhalb derer die Systemantwort größer als die Hintergrundamplitude ist.

6 Effekt der Betriebsgrößen auf das Emissionsverhalten

Als empirische Grundlage zur Beantwortung der aus dem Stand der Forschung abgeleiteten Forschungsfragen (Kapitel 3.1 und Abbildung 7) werden im vorliegenden Kapitel die Ergebnisse der Einflussgrößenanalyse für die Betriebsgrößen Temperatur, Betriebshistorie, Bremsdruck- und -geschwindigkeit beschrieben und diskutiert. Für die Bremsgeschwindigkeit wird insbesondere der Sonderfall bei nicht betätigter Bremse betrachtet. Die Schlussfolgerungen des Kapitels fließen in die kennfeldbasierte Modellierung von Bremspartikelemissionen ein, die in Kapitel 8 beschrieben ist.

6.1 Scheibentemperatur

Nachfolgend werden die Ergebnisse⁹⁹ beschrieben, die mittels der in Abschnitt 4.3.1 vorgestellten Untersuchungsmethodik generiert wurden. Wie in der Untersuchungsmethodik hergeleitet und beschrieben, erfolgt die Untersuchung anhand von Belägen mit organischen und anorganischen Bindemitteln, da der Stand der Forschung Indizien dafür liefert, dass organische Bindemittel für den sprunghaftigen Anstieg der Partikelanzahlemission oberhalb der kritischen Temperatur verantwortlich sind und die offene Fragestellung besteht, ob diese Zersetzungsprozesse ebenfalls die Abhängigkeit der Partikelmassenemission von der Scheibentemperatur beeinflussen.

6.1.1 Temperatureffekt auf die Partikelanzahlemission

Der folgende Abschnitt zielt auf die Beantwortung der Forschungsfrage ab, ob der sprunghafte Anstieg der Partikelanzahlemission oberhalb der kritischen Temperatur vermieden werden kann. Die Daten wurden im Rahmen der in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen einfachen Temperaturdreiecksversuche erhoben. Dabei wurde die Temperatur stufenweise in mehreren Bremsungen bis zu einem Maximum erhöht und anschließend stufenweise über mehrere Bremsungen verringert. Die Prozessführung ist in Abbildung 20 visualisiert.

⁹⁹ Nach Niemann, H. et al.: Influence of Disc Temperature on Particle Emissions (2020).

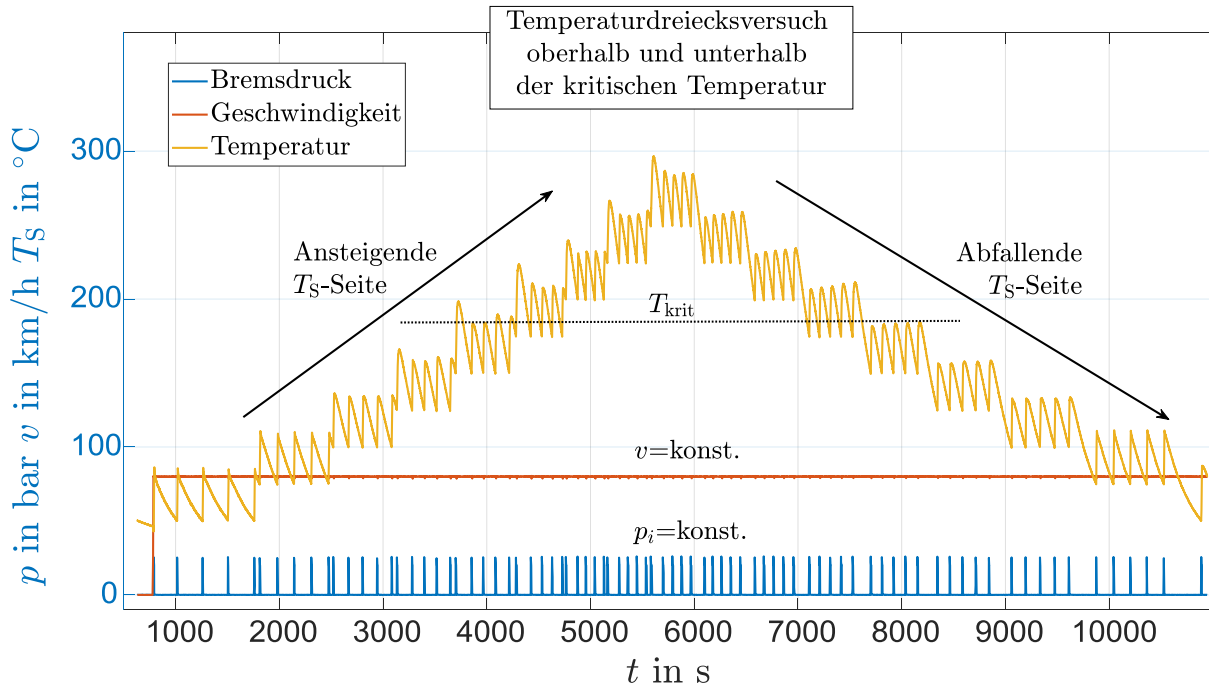


Abbildung 19: Prozessführung von Bremsdruck p , Geschwindigkeit v und Temperatur T_s zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeiten $n(T_s)$ und $m(T_s)$ unter- und oberhalb der erwarteten kritischen Temperatur

Zur Analyse der Abhängigkeit der Partikelanzahl von der Scheibentemperatur $n(T_s)$ ist die vom elektrischen Mobilitätsspektrometer Fast Mobility Particle Sizer (kurz: FMPS) detektierte temperaturabhängige Partikelanzahlemission in Abbildung 20 für konventionelle ECE-Bremsbeläge mit einem organischen Bindemittelmaterial aufgetragen. Für alle fünf Bremsungen einer jeden Temperaturstufe ist die Gesamtanzahl der emittierten Partikel pro Bremsung als Kreis eingezeichnet. Die Gesamtpartikelanzahlen in den ersten Bremsungen pro Stufe sind als gefüllte Kreisflächen markiert, während die folgenden vier Bremsungen als offene Kreise markiert sind. Bremsungen auf der ansteigenden Seite des Temperaturdreiecks sind blau, Bremsungen in der Nähe des Scheitelpunkts grün und Ereignisse auf der absteigenden Seite gelb markiert. Die Farbkodierung entspricht der Farbskala auf der rechten Seite des Diagramms, die die chronologische Reihenfolge der Bremsungen während des Experiments anzeigt. Zusätzlich ist die zeitliche Abfolge durch farbige Pfeile visualisiert. Für die erste Bremsung einer jeden Temperaturstufe ist die Anzahlgrößenverteilung über (für die aufsteigende Dreiecksseite) oder unter (absteigende Dreiecksseite) den Datenpunkten der Partikelanzahl aufgetragen. Diese Datenpunkte sind den Größenverteilungsplots durch identische Punkt-/Gitterfarbe und durch identische horizontale Position zugeordnet.

Unterhalb der kritischen Temperatur ist ein kontinuierlicher Anstieg (von 10^9 auf 10^{11}) der mechanisch erzeugten Partikel mit einem Partikelanzahlmaximum bei einer Mode von 200 nm zu erkennen (dunkelblauer Pfeil von A nach B). Wie aus der Literatur und früheren Studien zu erwarten, kommt es bei 180 $^{\circ}C$ zu einer Verschiebung des Maximums der Größenverteilung von 200 nm hin zu 10 nm großen Partikeln sowie zu einem sprunghaftigen

Anstieg der Partikelanzahl (hellblauer Pfeil B nach C). Oberhalb von 180 °C zeigt die messtechnisch erfasste Gesamtzahl pro Bremsereignis keine signifikante Änderung und bleibt konstant bei etwa 10^{12} Partikeln pro Bremsung. Für jeweils drei Temperaturstufen oberhalb der kritischen Temperatur ist das erste Bremsereignis mit der höchsten Partikelanzahl (Abbildung 20) und den höchsten Konzentrationen (Abbildung 21) im Vergleich zu den folgenden vier Ereignissen auf diesem Temperaturniveau verbunden (C bis D). Die Temperaturstufen oberhalb der kritischen Temperatur auf den absteigenden Seiten des Dreiecks (Abbildung 19) weisen eine deutlich geringere Anzahl von Partikelemissionen auf als die vorherigen Niveaus auf der aufsteigenden Seite (D bis E). Nukleation tritt nur noch einmal während der ersten Bremsung der absteigenden Seite auf (D), jedoch in geringerer Konzentration. Zudem tritt bemerkenswerterweise erneut bei 100 °C auf der absteigenden Seite des Temperaturdreiecks Nukleation auf (F), allerdings in zehnmal niedrigerer Konzentration als auf der aufsteigenden Dreiecksseite.

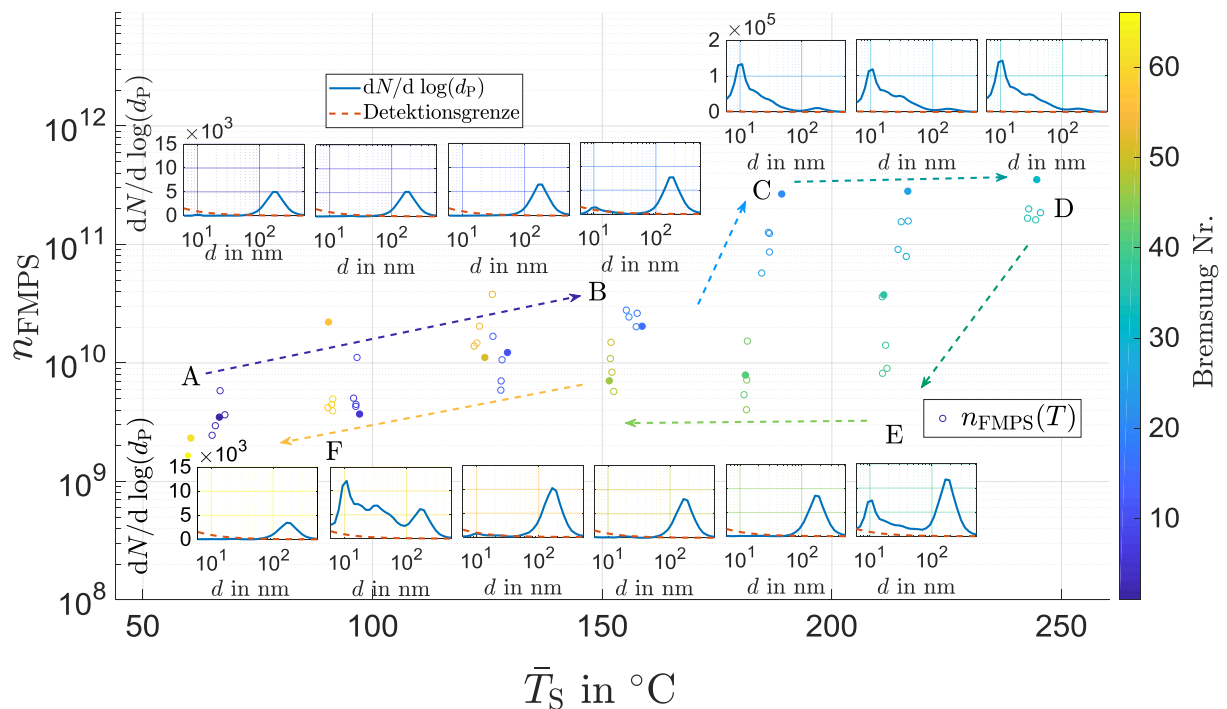


Abbildung 20: Emittierte und vom FMPS gemessene Partikelanzahl n_{FMPS} pro Bremsung aufgetragen über der mittleren Brems Scheibentemperatur \bar{T}_S während der Bremsung für einen ECE-Belag mit organischem Bindemittel.

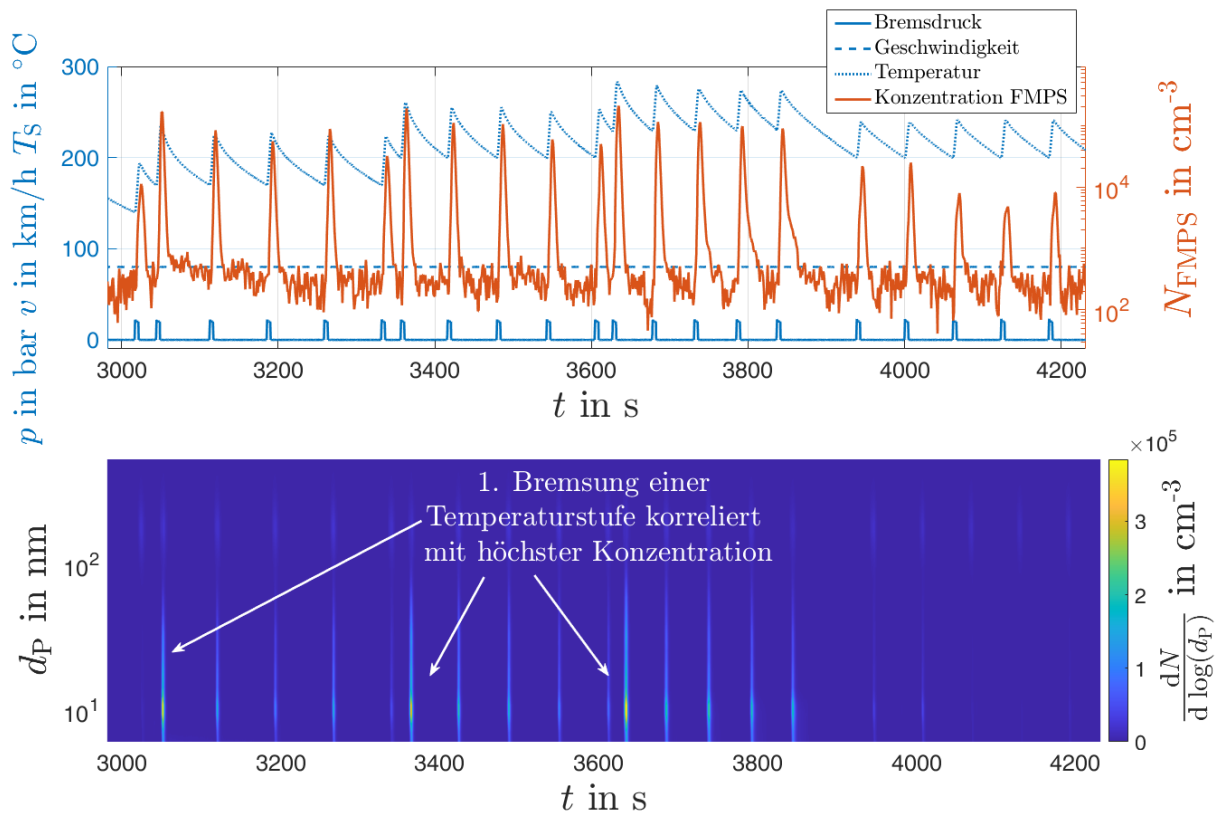


Abbildung 21: Zeitverlauf von Bremsdruck p , Geschwindigkeit v , Temperatur T , Anzahlkonzentration N_{FMPS} (oben) und Anzahlgrößenverteilung des FMPS (unten) während der drei höchsten Temperaturstufen auf der ansteigenden Seite des Temperaturdreiecks für einen ECE-Belag mit organischem Bindemittel

Bei den Belägen mit anorganischen Bindemitteln ist bis 210 °C kein sprungartiger Anstieg der Anzahlemissionen durch Nukleation zu beobachten. Erst bei der höchsten Temperaturstufe von 240 °C (siehe Abbildung 22) und nur bei der zweiten Wiederholung des Tests ist eine Nukleation zu erkennen. Bei der ersten Wiederholung trat ebenfalls ein Nukleationsereignis auf, wurde jedoch nur vom Condensation Particle Counter (kurz: CPC) erfasst, der einen geringeren minimalen detektierbaren Partikeldurchmesser von 2,5 nm anstelle von 5,6 nm (FMPS) aufweist. Im Bereich von 70...230 °C zeigt die Gesamtzahl der mechanisch erzeugten Partikel mit steigender Temperatur einen negativen Trend. Dieses Verhalten steht im Gegensatz zu den Belägen mit organischem Bindemittel. Die Gesamtzahl der Partikel vor Auftreten der Nukleation liegt in der Größenordnung von 10^{10} bis 10^{11} Partikeln und somit durchschnittlich oberhalb der Partikelanzahlen mit organischem Bindemittel.

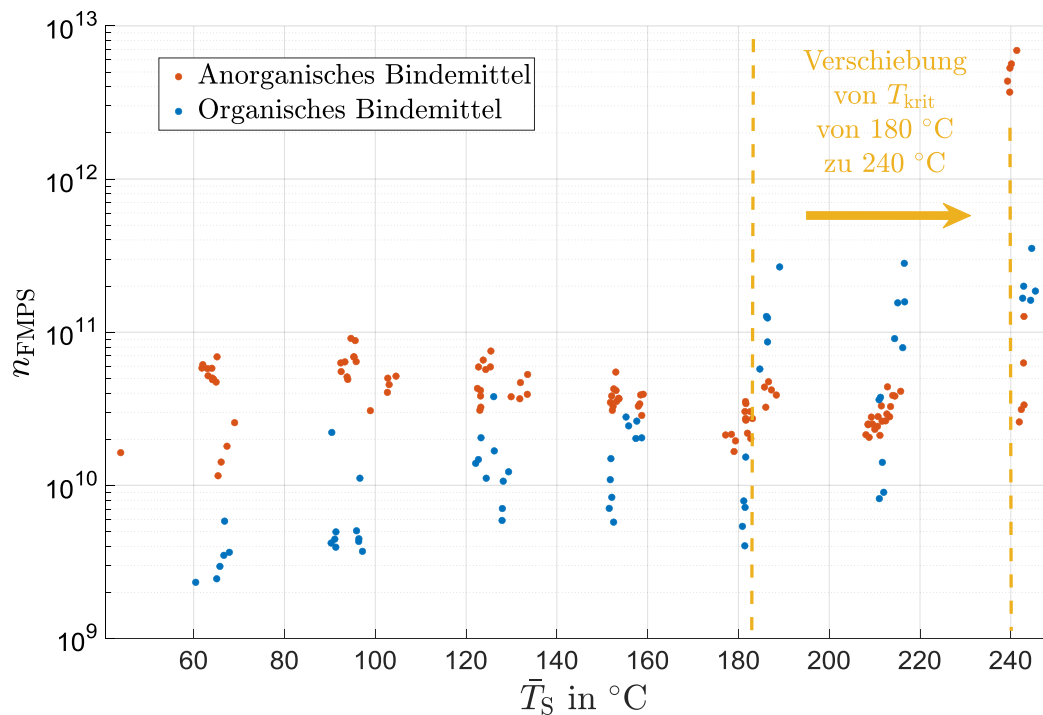


Abbildung 22: Emittierte Anzahl an Partikel n_{FMPs} pro Bremsung aufgetragen über der durchschnittlichen Brems Scheibentemperatur \bar{T}_S für einen ECE-Belag mit organischem Bindemittel und einem prototypischen Bremsbelag mit anorganischem Bindemittel

6.1.2 Temperatureffekt auf PM_{10} -Emissionen

Die Untersuchung der Temperaturabhängigkeit von PM_{10} -Emissionen ist entsprechend der Untersuchungsmethodik in zwei Teile gegliedert. Im folgenden Abschnitt wird der Teil der Untersuchung mit einzelnen Temperaturdreiecken beschrieben, die einen Temperaturbereich unterhalb und oberhalb der kritischen Temperatur umfassen. Die Zeitreihen von Bremsdruck, Geschwindigkeit, Temperatur und OPS-Konzentration (PM_{10} -relevanten Partikel), die von den Belägen mit organischem Bindemittel emittiert werden, sind in Abbildung 23 aufgetragen. Die blau gestrichelte Linie stellt die Scheibentemperatur dar, die auf der aufsteigenden und absteigenden Seite symmetrisch verläuft. Im Gegensatz zum Temperatureingangssignal ist die Antwort des Systems in Form der vom OPS gemessenen Konzentration asymmetrisch mit einer Verschiebung zur linken Seite. Das Konzentrationsmaximum wird bei etwa 180-220 °C erreicht. Obwohl die Temperatur weiter erhöht wird, nimmt die Konzentration ab und fällt während des gesamten absteigenden Dreiecks auf ein niedriges Niveau ab.

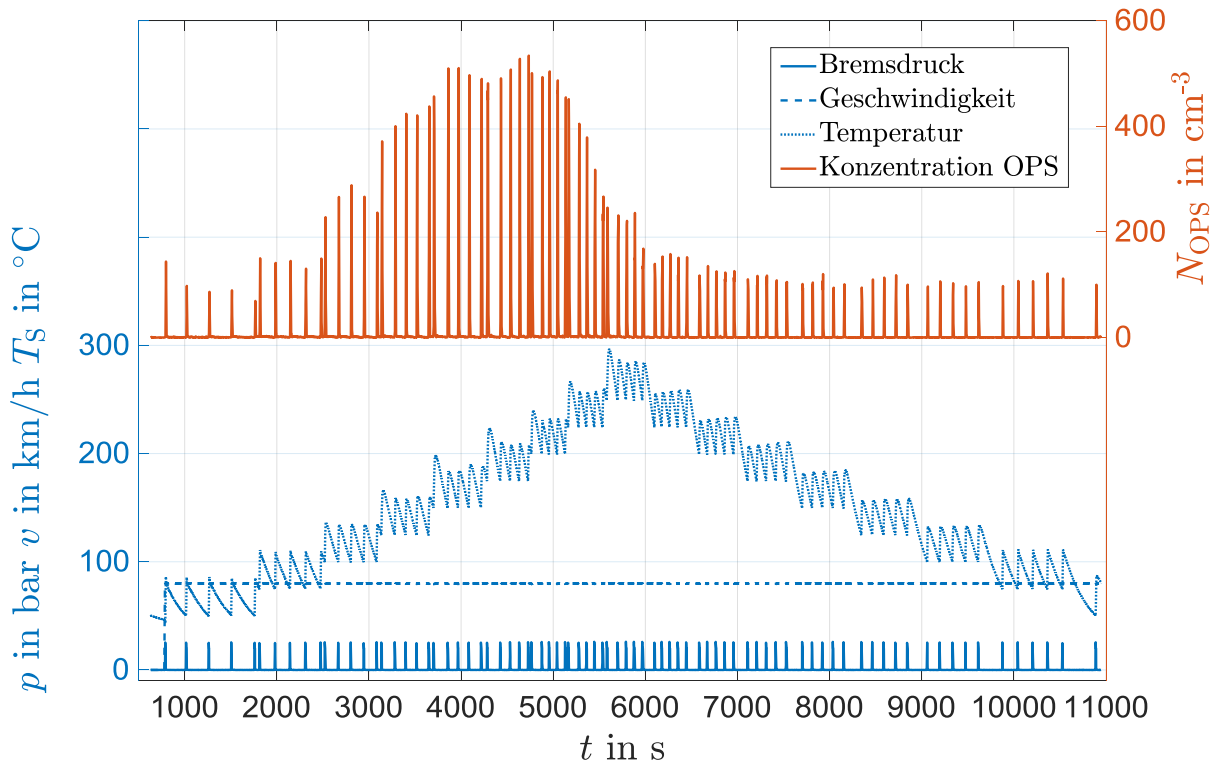


Abbildung 23: Zeitverlauf von Bremsdruck p , Geschwindigkeit v , Temperatur T_s und der OPS-Anzahlkonzentration N für einen ECE-Belag mit organischem Bindemittel (analog zu Abbildung 19). Trotz des zeitlich symmetrischen Temperaturprofils erfolgt eine zeitlich asymmetrische Systemantwort bzw. Emission, die eine Änderung der Temperaturabhängigkeit des Systems andeutet.

Abbildung 24 stellt den Effekt der Temperatur auf die vom OPS berechneten PM_{10} -Emissionen dar. Für die Berechnung von PM_{10} auf Basis der Größenverteilung wird eine konstante Dichte von $\rho = 3,5 \text{ g/cm}^3$ angenommen. Die Korrelation zwischen PM_{10} , Temperatur und dem Reibungskoeffizienten μ^{100} wird in Abbildung 24 mit drei zusammenhängenden Diagrammen visualisiert. Im linken oberen Diagramm ist die berechnete PM_{10} -Emission pro Bremsung über der mittleren Scheibentemperatur pro Bremsung aufgetragen. Wie aufgrund des asymmetrischen Zeitreihenverlaufs in Abbildung 23 zu erwarten, ist die Temperaturabhängigkeit durch eine Hysterese gekennzeichnet. Der Reibungskoeffizient weist ebenfalls eine Hysterese mit einem Maximum bei der gleichen Temperatur (180 °C) wie PM_{10} auf, was der kritischen Temperatur entspricht, die aus den obenstehenden Erkenntnissen zur Nukleation bekannt ist (Abbildung 22). Ein möglicher Zusammenhang zwischen PM_{10} und dem Reibwert wird im unteren Diagramm von Abbildung 24 visualisiert, in dem zwei Bereiche mit unterschiedlichen Steigungen vorliegen. Im ersten Bereich sind die Datenpunkte nahezu horizontal verteilt. Dieses Regime besteht nur aus 10 Bremsereignissen, die den ersten beiden Temperaturstufen unter 100 °C entsprechen. Ab dem elften Bremsereignis ist ein Anstieg von PM_{10} zu beobachten. Der Anstieg der emittierten

$$\mu^{100} = \frac{M_B}{2 r_{\text{eff}} A_{\text{Kolben}} \eta_{\text{Wirk}} (p_{\text{hyd}} - p_{\text{Anlege}})}$$

Masse erreicht sein Maximum, bevor die höchste Temperatur erreicht wird, was anhand des Farbbalkens visualisiert ist, der die Reihenfolge der Bremsungen repräsentiert.

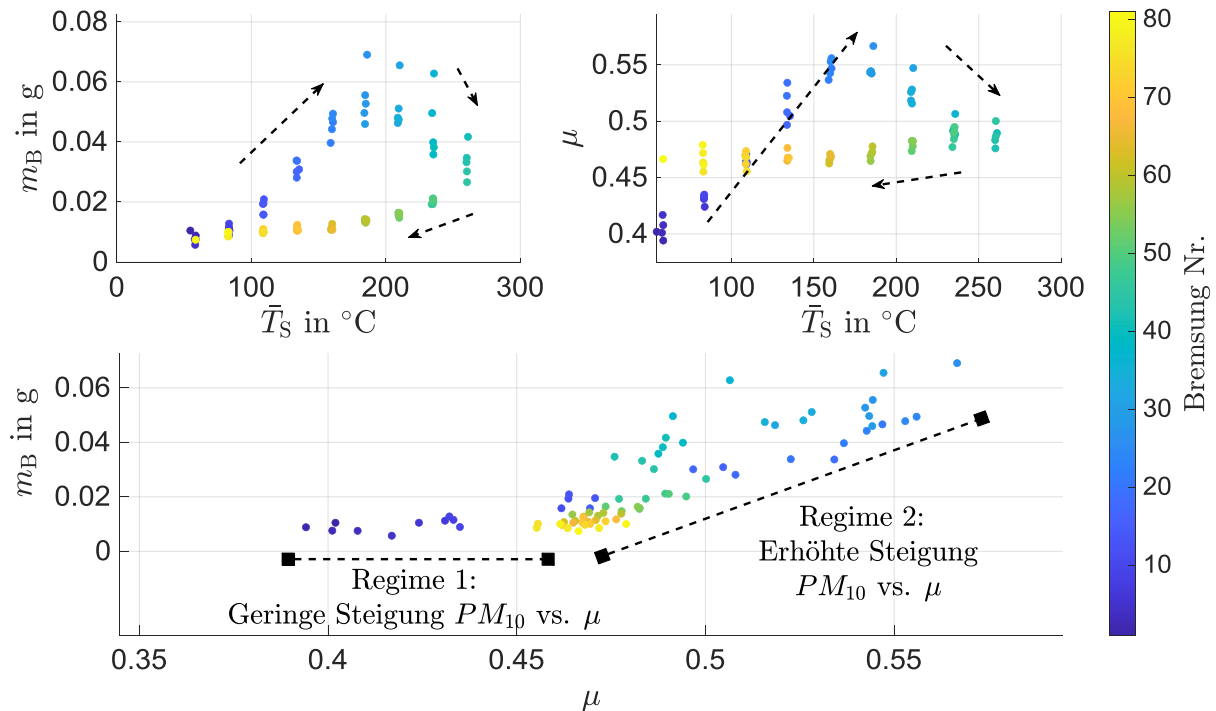


Abbildung 24: Korrelation der PM_{10} -Emission pro Bremsung (berechnet auf Grundlage der mit dem OPS gemessenen Größenverteilung und einer Dichte von $3,5 \text{ g/cm}^3$), der durchschnittlichen Scheibentemperatur \bar{T}_S sowie des Reibwerts μ für einen ECE-Belag mit organischem Bindemittel.

Die analoge Darstellung für die prototypischen Beläge mit anorganischem Bindemittel ist in Abbildung 25 dargestellt. Im Gegensatz zum vorherigen Versuch wurde auf Grund zeitlicher Rahmenbedingungen direkt nach dem ersten Temperaturdreieck ein zweites Temperaturdreieck angehängt und bei der zweiten Temperaturstufe der absteigenden Dreiecksseite abgebrochen. Nach der ersten aufsteigenden Dreiecksseite (dunkelblau) ist keine offensichtliche Temperaturabhängigkeit der emittierten Partikelmasse pro Bremsung sowie des Reibwertes zu beobachten, da die Massendatenpunkte nach der ersten aufsteigenden Dreiecksseite nahezu horizontal gestreut sind. Dennoch zeigen die Massendatenpunkte eine Hysterese während der ersten aufsteigenden Dreiecksseite. Auch hier liegen offenbar zwei Bereiche vor: Der erste Bereich, bei dem es sich um einen Einfahrprozess zu handeln scheint, liegt unterhalb von Reibwerten von 0,4 auf der aufsteigenden Seite des ersten Dreiecks und ist mit dunkelblauen Punkten gekennzeichnet. Der zweite Bereich liegt oberhalb von Reibwerten von 0,4. Er umfasst den Großteil der Datenpunkte und weist einen augenscheinlichen, leicht steigenden Trend auf. Es ist zudem wichtig zu erwähnen, dass die Massenwerte in Abbildung 24 und Abbildung 25 nur qualitativ, aber nicht quantitativ verglichen werden können, da die Versuche mit organischem Bindemittel mit temperaturgesteuerten Bremsungen und die Versuche mit anorganischem Bindemittel mit zeitgesteuerten Bremsungen durchgeführt wurden.

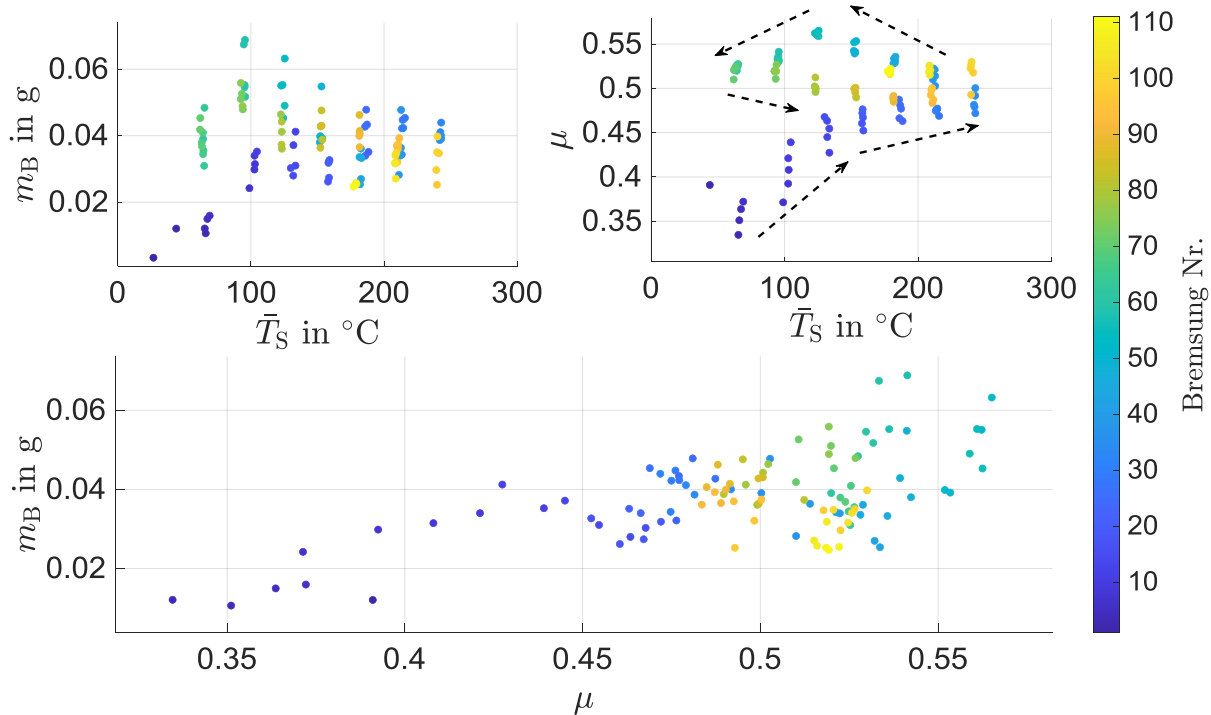


Abbildung 25: Korrelation der PM_{10} -Emission pro Bremsung (berechnet auf Grundlage der mit dem OPS gemessenen Größenverteilung und einer Dichte von $5,0 \text{ g/cm}^3$), der durchschnittlichen Scheibentemperatur T sowie des Reibwerts μ für einen prototypischen Belag mit anorganischem Bindemittel.

Aufgrund des geänderten PM_{10} -Emissionsverhaltens (Hysterese) oberhalb der kritischen Temperatur findet der zweite Teil der Untersuchungen unterhalb der kritischen Temperatur statt (siehe Untersuchungsmethodik in Abschnitt 4.3.1). Die für jede Temperaturstufe gemittelten PM_{10} -Emissionen pro Bremsereignis sind in Abbildung 26 (Betriebspunkte 50 km/h und 123 km/h) und Abbildung 27 (Betriebspunkte 73 km/h und 98 km/h) aufgetragen. In der oberen Reihe sind die Dreiecke von links nach rechts mit aufsteigender Anzahl der Temperaturstufen und in der unteren Reihe mit absteigender Anzahl der Temperaturstufen von rechts nach links dargestellt.

Trotz einer Ausnahme im 73 km/h-Dreieck mit der höchsten Temperatur ist der Trend über der Temperatur ansteigend und sowohl qualitativ als auch quantitativ reproduzierbar. Dies wird besonders deutlich, wenn man die entsprechenden Dreiecke auf der aufsteigenden und absteigenden Seite vergleicht, die in den Abbildung 26 und Abbildung 27 vertikal zueinander angeordnet sind. So ist zum Beispiel das dritte Dreieck von links in der oberen Reihe mit dem dritten Dreieck von links in der unteren Reihe vergleichbar. Der einzige Fall einer qualitativen Änderung wurde während der abfallenden Dreiecke in Abbildung 27 nach der oben beschriebenen Ausnahme auf dem höchsten Temperaturniveau der 73 km/h-Bremsungen beobachtet. Während dieser abfallenden Dreiecke zeigten die Emissionen einen leichten Anstieg im Vergleich zur aufsteigenden Dreiecksseite. Alle PM_{10} -Emissionen pro Bremsereignis liegen in der Größenordnung von 10 mg. Der PM_{10} -Anstieg über der Temperatur beträgt ca. Faktor zwei zwischen dem niedrigsten und dem höchsten Temperaturniveau.

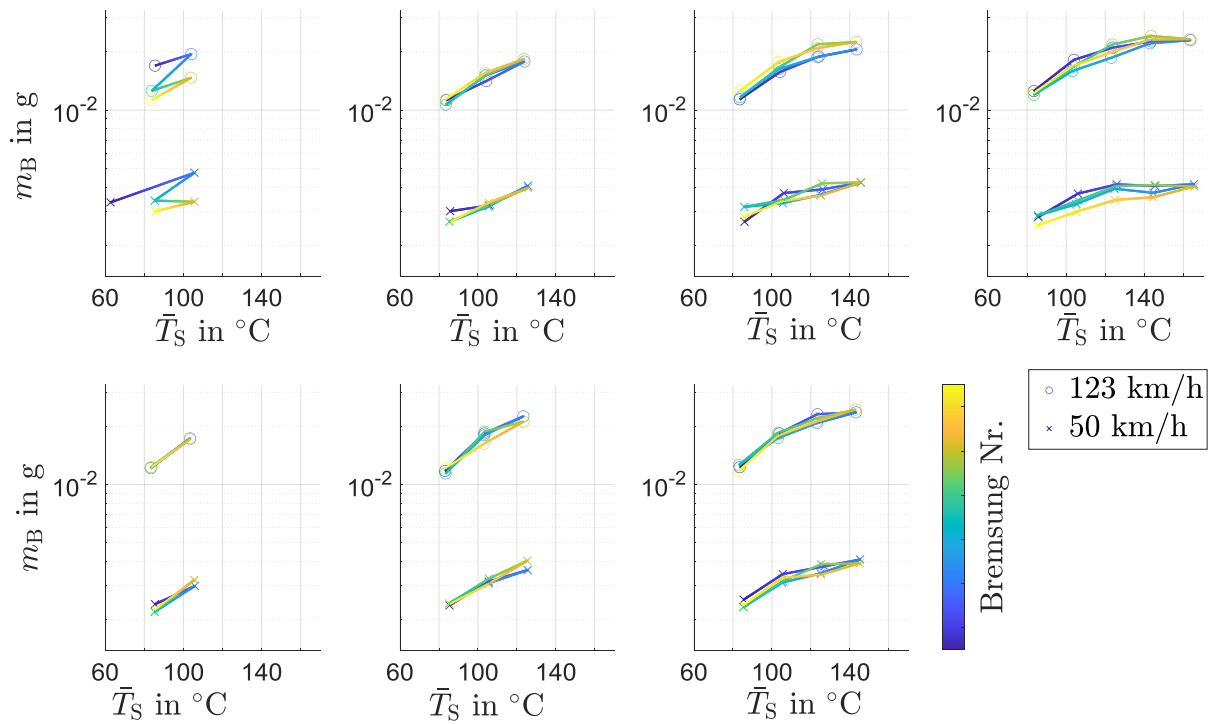


Abbildung 26: PM_{10} -Emission pro Bremsung gemittelt über jede Temperaturstufe für einen ECE-Belag mit organischem Bindemittel bei 50 und 123 km/h

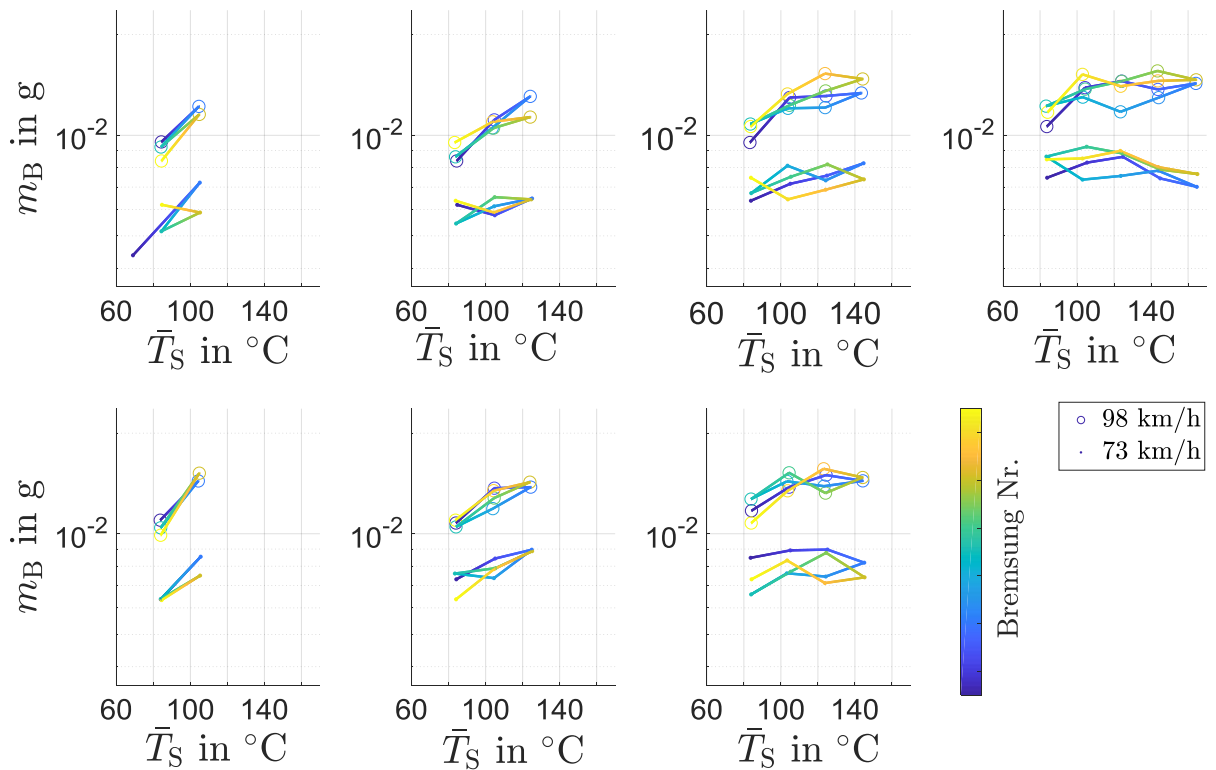


Abbildung 27: PM_{10} -Emission pro Bremsung gemittelt über jede Temperaturstufe für einen ECE-Belag mit organischem Bindemittel bei 73 und 98 km/h

Die Abhängigkeit der PM_{10} -Emission von Temperatur und Reibwert ist in Abbildung 28 analog zu den Diagrammen im vorherigen Abschnitt aufgetragen. Ein Hystereseverhalten ähnlich zu dem, wie es in den Versuchen oberhalb der kritischen Temperatur aufgetreten ist, wurde nicht beobachtet. Wie im vorherigen Dreiecksversuch, der oberhalb der kritischen Temperatur durchgeführt wurde, zeigen PM_{10} und der Reibwert eine augenscheinliche Korrelation zu Temperatur bzw. Bremsungsnummer, die bei 50 km/h und 123 km/h unterschiedliche Steigungen aufweist.

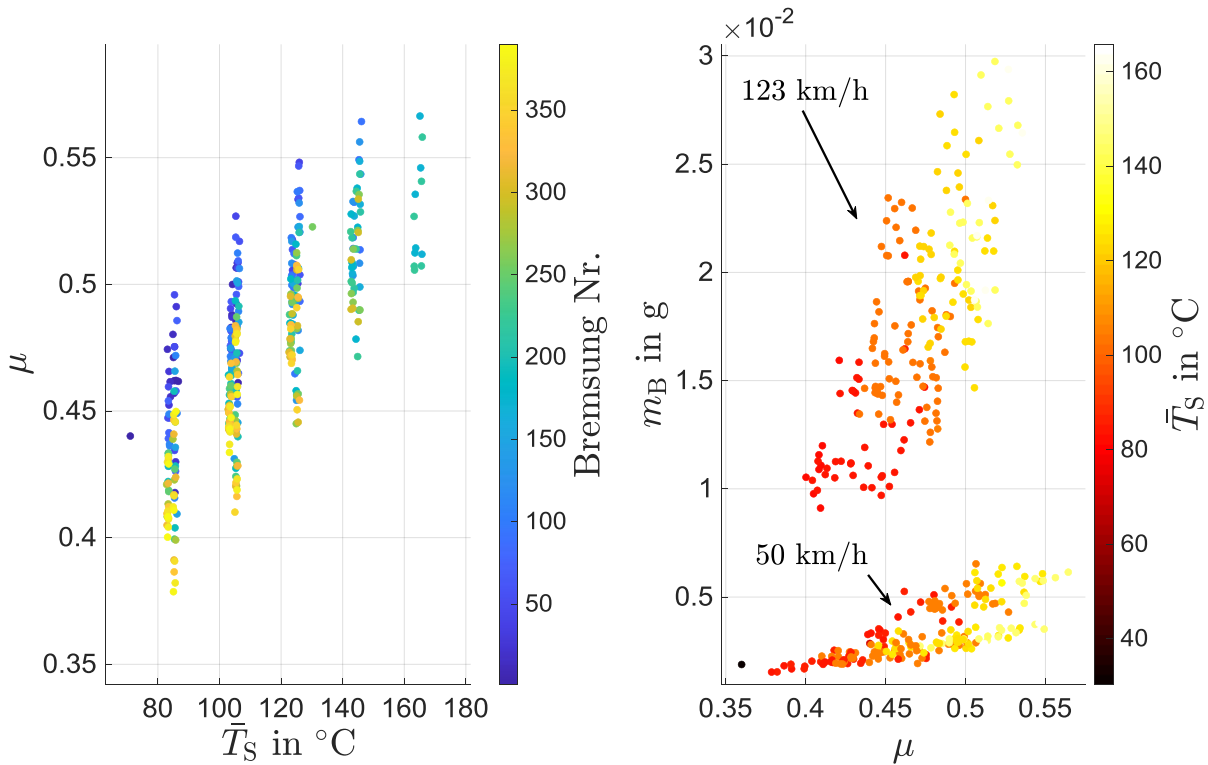


Abbildung 28: Reibwert μ links) und PM_{10} -Emission pro Bremsung (rechts, berechnet mit der OPS-Anzahlgrößenverteilung und einer Dichte von $3,5 \text{ g/cm}^3$) über der mittleren Scheibentemperatur \bar{T}_S pro Bremsung für die Beläge mit organischem Bindemittel während des Temperaturdreieckstests unterhalb der kritischen Temperatur.

Entsprechend des aktuellen Stands der Forschung wurden Nukleationsereignisse oberhalb einer Temperatur von 180 °C beobachtet. Diese Temperatur stimmt mit dem in der Literatur von mehreren Autoren genannten Bereich überein. Eine Ausnahme stellt hierbei die Beobachtung von Kukutschová et al.¹⁰¹ dar, die Nukleation oberhalb von 300 °C Scheibentemperatur beobachteten. 180 °C ist niedriger als die Zersetzungstemperatur des Rohbindemittels^{102 103}, das die niedrigste Zersetzungstemperatur ($250\text{-}300 \text{ °C}$) der organischen Belaginhaltstoffe aufweist. Da die lokale Temperatur in der Reibfläche jedoch höher sein dürfte als die integrale Scheibentemperatur, ist diese Diskrepanz zwischen Zersetzungs-

¹⁰¹ Kukutschová, J. et al.: On airborne nano/micro-sized wear particles released from brakes (2011), S. 1005.

¹⁰² Kukutschová, J. et al.: On airborne nano/micro-sized wear particles released from brakes (2011).

¹⁰³ S. Ramousse et al.: Thermal Characterisation of Brake Pads (2001).

temperatur und kritischer Nukleationstemperatur zu erwarten. Möglicherweise findet die Zersetzung in der Reibzone bereits bei niedrigeren Scheibentemperaturen statt, aber die emittierte Konzentration der Nukleationspartikel reicht nicht aus, um zu einem nachweisbaren Durchmesser zu agglomerieren, wie es im ersten Dreieck des Tests mit dem anorganischen Bindemittel geschah, als die Nukleation nur durch den CPC, nicht aber durch das FMPS nachgewiesen wurde.

Die Erzeugung von Nukleationspartikeln durch die Zersetzung von organischen Belagmaterialien zeichnete sich dadurch aus, dass die Anzahl an gemessenen Nukleationspartikeln bei gleichen aufeinanderfolgenden Bremsereignissen abnahm, sodass stets die zeitlich erste Bremsung auf einer Temperaturstufe die größte Menge an Partikeln emittiert. Dieses Phänomen stimmt mit dem Erklärungsansatz überein, dass Nukleation durch Zersetzung hervorgerufen wird, da das „zur Zersetzung verfügbare“ Material innerhalb der Reibfläche begrenzt ist und mit fortschreitendem Wärmeeintrag „verbraucht“ wird. Die Beobachtung von Farwick zum Hagen et al.¹⁰⁴, dass Belagmaterialien mit einer Laufleistung von 6000 km bis 215 °C keine Nukleation erzeugen, könnte auch durch den „Verbrauch“ des organischen Bindemittels durch Zersetzung bei möglicherweise vorangegangenen Hochtemperatur-Bremsereignissen erklärt werden.

Die getesteten Beläge mit anorganischem Bindemittel, das bis 800 °C thermisch stabil ist, weisen eine höhere kritische Temperatur als die getesteten Beläge mit organischem Bindemittel auf. Die beobachtete kritische Temperatur verschiebt sich mit dem anorganischen Bindemittel um mindestens 60 °. Wie von Ramousse¹⁰⁵ und Kukutschová¹⁰⁶ bekannt, werden neben phenolischen Bindemitteln auch andere organische Materialien, die in Bremsbelägen vorhanden sind, bei hohen Temperaturen zersetzt, so z. B. Koks bei 300...400 °C. Analog zur Zersetzung des Bindemittels sind die Zersetzungstemperatur des Koks und die Scheibentemperatur für den Beginn der Nukleation aufgrund der Position des Thermoelementes 0,5 mm unterhalb der Reibfläche nicht gleich, sondern vermutlich kleiner.

Gemäß Abbildung 24 treten die Maxima von $PM_{10}(T_s)$ und $\mu(T_s)$ bei der gleichen Temperatur auf, bei der zudem auch Nukleation auftritt und die des Weiteren im Bereich der Zersetzungstemperatur des organischen Bindemittels liegt. Dies legt nahe, dass die Zersetzung für dieses abnehmende Verhalten verantwortlich ist. Diese Beobachtung deutet zudem darauf hin, dass PM_{10} und μ miteinander korrelieren, wie es im zweiten Bereich in Abbildung 24 zu sehen ist. Eine Korrelation zwischen PM_{10} und μ ist plausibel, da die abrasive Reibung auf der plastischen Verformung von Reibpartnern beruht, die Verschleißpartikel

¹⁰⁴ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: On-road vehicle measurements of brake wear emissions (2019).

¹⁰⁵ S. Ramousse et al.: Thermal Characterisation of Brake Pads (2001).

¹⁰⁶ Kukutschová, J. et al.: On airborne nano/micro-sized wear particles released from automotive brakes (2011).

verursacht, die wiederum als Feinstaub in die Umgebungsluft emittiert werden. Diese Verschleißpartikel bestehen teilweise aus PM_{10} , aber auch aus größeren Partikeln.

Die Hypothese, dass die Zersetzung des organischen Bindemittels zu dem beobachteten Hystereseverhalten führt, wird dadurch untermauert, dass das Fehlen eines organischen Bindemittels zu einem Emissions- und Reibungsverhalten ohne Temperaturhysterese führt, wie es bei den Versuchen mit einem anorganischen Bindemittel zu sehen ist (Abbildung 25).

Bei den Belägen mit organischem Bindemittel wurde ein Verhalten ohne Hysterese nur unterhalb der kritischen Temperatur erreicht (Abbildung 26 und Abbildung 28). Unterhalb der kritischen Temperatur wurde ein reproduzierbarer Temperatureinfluss auf PM_{10} beobachtet. Es ist jedoch unklar, ob diese Reproduzierbarkeit unterhalb der kritischen Temperatur durch das Vorhandensein eines intakten, nicht oxidierten Bindemittels oder durch andere unbekannte Prozesse hervorgerufen wird. Die Korrelation der kritischen Temperatur für ultrafeine Partikel und die Änderung des PM_{10} -Emissionsverhaltens weisen zwar auf einen kausalen Zusammenhang hin, können diesen naturgemäß aber nicht beweisen, da Korrelation keinen Nachweis für Kausalität darstellt.

Sowohl bei organischen als auch bei anorganischen Bindemitteln ist eine Adaption des Reibwerts während der ersten Bremsungen der Tests zu beobachten. Solche Adaptionprozesse sind aus der Literatur bekannt, z. B. aus Tribometeruntersuchungen von Ostermeyer^{107 108} und Eriksson¹⁰⁹.

6.1.3 Zwischenfazit Scheibentemperatur

Basierend auf den beschriebenen Ergebnissen und der anschließenden Diskussion werden im Folgenden die fünf im Kapitel 3.1.1 genannten Forschungsfragen beantwortet, um die in dieser Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse zusammenzufassen:

6.1.3.1 Ultrafeine Partikelemissionen

Forschungsfrage 1: Ist es möglich, Nukleationsereignisse zu vermeiden oder die kritische Temperatur durch die Substitution organischer Belagbindemittel zu erhöhen?

Gemäß dem aktuellen Stand der Forschung wurden in dieser Untersuchung Nukleationsereignisse erzeugt und die kritische Temperatur für das konventionelle Belagmaterial mit organischem Bindemittel liegt im bekannten Bereich von ca. 180 °C. Mittels einer systematischen Temperaturvariation (dreieckiges Temperatur-Testsignal)

¹⁰⁷ Ostermeyer, G. P.; Müller, M.: Surface Topography and Wear Dynamics of Brake Pads.

¹⁰⁸ Ostermeyer, G. P.; Wilkening, L.: Experimental Investigations of the Topography in Brake Pads (2013).

¹⁰⁹ Mikael Eriksson, Filip Bergman, Staffan Jacobson: On the nature of tribological contact in brakes (2002).

wurde die Untersuchung unabhängig von anderen Einflussfaktoren wie Geschwindigkeit, Druck und Reibhistorie ermöglicht. Zur genaueren Visualisierung der Nukleation wurde eine grafische Darstellungsweise gewählt, die es ermöglicht, sowohl die Temperaturabhängigkeit der Größenverteilung als auch die Zunahme der Partikelanzahlemission in einem Diagramm darzustellen.

Die aus der Literatur bekannte Hypothese, dass die Zersetzungsprozesse des phenolischen Bindemittels für die Nukleation verantwortlich sind, hat sich bewährt, da die kritische Temperatur durch die Verwendung von prototypischem Belagmaterial ohne Phenolharzbinder erhöht wurde. Die kritische Temperatur verschiebt sich hierbei um mindestens 60 ° hin zu höheren Temperaturen.

Im Hinblick auf eine mögliche gesetzliche Regelung der Partikelanzahlemissionen ist diese Verschiebung um mindestens 60 ° relevant, da das geplante Prüfverfahren der PMP Brems-scheibentemperaturen von bis zu 170 °C an der Vorderachse und 180 °C an der Hinterachse zulässt¹¹⁰. Beide Temperaturen liegen im Bereich der bekannten kritischen Temperaturen und eine Nukleation ist bei einem solchen Test nicht auszuschließen.

Forschungsfrage 2: Inwiefern wird die Reproduzierbarkeit von bremsbedingten Nukleationsereignissen durch thermische Zersetzungsprozesse von Belagmaterialien beeinflusst?

Die Menge der erzeugten Nukleationspartikel nimmt mit fortlaufenden Bremsereignissen auf konstantem Temperaturniveau ab. Dies deutet auf einen thermischen Alterungseffekt des Belagmaterials durch Zersetzung hin. Es ist unbekannt, bis zu welcher thermischen Belastung sich das Belagmaterial erholen kann bzw. welche Eindringtiefe die Zersetzungsprozesse bei einer bestimmten thermischen Belastung erreichen. Diese Frage könnte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein, da sich die Frage stellt, ob Nukleationsprozesse ein Phänomen unter realen Fahrbedingungen sind oder nur bei neuen Belägen unter Laborbedingungen auftreten.

6.1.3.2 PM_{10} -Emission

Forschungsfrage 1: Mittels welcher Methoden kann der Effekt der Scheibentemperatur auf die PM_{10} -Emission in einem Schwungmassenprüfstandsversuch bestimmt werden?

Diese Untersuchung ergab, dass einzelne und erweiterte Temperaturdreiecke eine geeignete Methode sind, um den Effekt der Scheibentemperatur auf die PM_{10} -Emissionen einer Scheibenbremsanlage auf einem geschlossenen Schwungmassenprüfstand zu quantifizieren. Nach Farwick zum Hagen und Mathissen et al.¹¹¹ konnte ein Zusammenhang zwischen Temperatur und PM_{10} bei realen Fahrzyklen wie dem LACT nicht gefunden werden. Dies

¹¹⁰ UNECE Particle Measurement Program: Non-Exhaust Brake Emissions — Laboratory testing.

¹¹¹ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019), S. 5148.

deutet darauf hin, dass andere Einflussgrößen stärker sind als die Temperatur, was mit eigenen Ergebnissen aus dem Abgas-WLTP im Einklang steht (siehe Abbildung 29). Im Rahmen der Temperaturdreiecksversuche steigt die PM_{10} -Emission jedoch im Temperaturbereich von 80 bis 160 °C etwa um den Faktor zwei an.

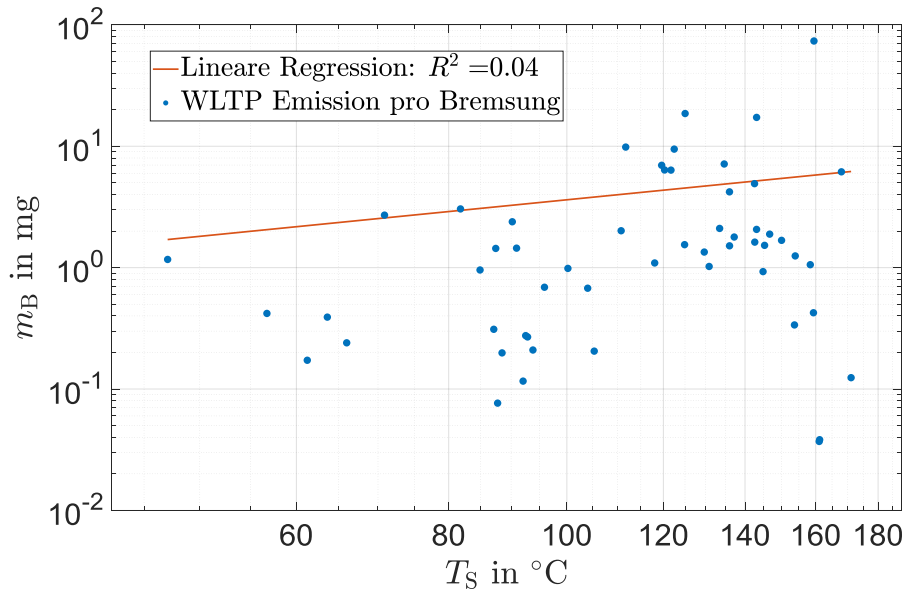


Abbildung 29: PM_{10} -Emission pro Bremsung in Abgas-WLTP-Fahrzyklen aufgetragen über der mittleren Scheibentemperatur während der Bremsung für einen ECE-Belag. Vergleichende Auswertung auf Datengrundlage des Experiments für simulative Vorhersage (Kapitel 8.2)

Forschungsfrage 4: Inwiefern beeinflussen thermische Zersetzungsprozesse der Belagmaterialien die Temperaturabhängigkeit der PM_{10} -Emission?

Bei Überschreiten der kritischen Temperatur weisen die mit Hysterese behafteten Verläufe von $PM_{10}(T_S)$ und $\mu(T_S)$ bei der gleichen Temperatur ein Maximum auf. Aufgrund dieses Zusammenhangs wird angenommen, dass die Zersetzung des organischen Bindemittels zu einer verringerten Steigung des Zusammenhangs $PM_{10}(T_S)$ führt. Diese Annahme wird durch die Beobachtung gestützt, dass die Beläge mit anorganischem Bindemittel ihr Verhalten nicht in ähnlicher Weise ändern. Alle Beobachtungen zeigten eine lineare Korrelation zwischen PM_{10} und μ .

Forschungsfrage 5: Inwiefern beeinflussen thermische Zersetzungsprozesse der Belagmaterialien die Reproduzierbarkeit von temperaturabhängigen PM_{10} -Emissionskennfeldern?

Unterhalb der kritischen Temperatur konnte eine reproduzierbare Temperaturabhängigkeit durch die Verwendung eines erweiterten Temperaturdreiecksexperiments gemessen werden, das aus mehreren Dreiecken mit steigender und fallender Anzahl von Temperaturstufen besteht.

6.2 Reibhistorie

Wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben setzt sich die Untersuchungsmethodik zur Quantifizierung des Reibhistorieneinfluss aus zwei Teilen zusammen. Der erste besteht aus einer vollfaktoriellen Variation¹¹² der Reibhistorie in Druck und Geschwindigkeit. Im zweiten Teil erfolgt jeweils eine Einzelvariation¹¹³ der Bremsdruck- und Geschwindigkeitshistorie. Die auf die Ergebnisdarstellung folgende Diskussion der Ergebnisse wird durch Mikroskopaufnahmen der Belagoberfläche ergänzt, um aus der Literatur bekannte Erklärungsansätze zu überprüfen.

6.2.1 Ergebnisse der vollfaktoriellen Variation

Die Ergebnisse des sternförmigen, vollfaktoriellen Versuchsplans sind für drei verschiedene Reibpaarungen in Abbildung 30 bis Abbildung 32 dargestellt. Die Variation der Reibpartner (ECE, NAO, Scheibenperforierung) dient dazu, die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf verschiedene Reibpaarungen zu untersuchen:

1. 342 mm Graugussscheibe glatt mit ECE-Belag
2. 342 mm Graugussscheibe gelocht mit ECE-Belag
3. 342 mm Graugussscheibe glatt mit NAO-Belag

Sie enthalten acht Emissionszeitverläufe in Form der PM_{10} -Emission pro Bremsung in den acht Referenzblöcken nach den Arbeitspunkten 1 bis 4 sowie 6 bis 9. In einem Großteil der Verläufe treten ansteigende oder abfallende Trends auf, die sich asymptotisch ähnlich hohen Endwerten nähern. Die Arbeitspunkte 3 (2,5 bar; 100 km/h) und 6 (5 bar; 100 km/h) sind durch einen für alle drei Reibpaarungen konsistent ansteigenden Verlauf gekennzeichnet, wohingegen der Verlauf im Arbeitspunkt 7 konsistent abfallend ist. Aus den vorhandenen Daten kann jedoch kein eindeutiges Muster extrahiert werden, dass bestimmte Reibhistorien zu temporären Überhöhungen und andere Historien zu temporären Verringerungen führen.

Die maximalen temporären Emissionsüberhöhungen bzw. -verringerungen liegen für alle drei Reibpaarungen ca. um Faktor drei über bzw. unterhalb den stationären Endwerten. Zur Beschreibung des asymptotischen Verlaufs dient im Folgenden ein exponentieller Erklärungsansatz:

$$m_B = m_0 \left(1 - e^{\frac{-t_B}{\tau_{\text{Adapt}}}} \right) \quad 6.1$$

m_{ges} stellt die emittierte Masse pro Bremsung, t_B die Bremszeit in Sekunden während der Bremsungen eines Referenzblocks und m_0 den stationären Endwert der emittierten Masse

¹¹² Nach Niemann, H. et al.: Untersuchung des Partikelemissionsverhaltens von Scheibenbremsen (2019).

¹¹³ Nach Niemann, H. et al.: Map based simulation of brake wear particle emissions (2020).

pro Bremsung nach erfolgter Adaption dar. Dieser exponentielle Erklärungsansatz entspricht mathematisch einem PT1-Glied mit einer Zeitkonstanten τ_{Adapt} .

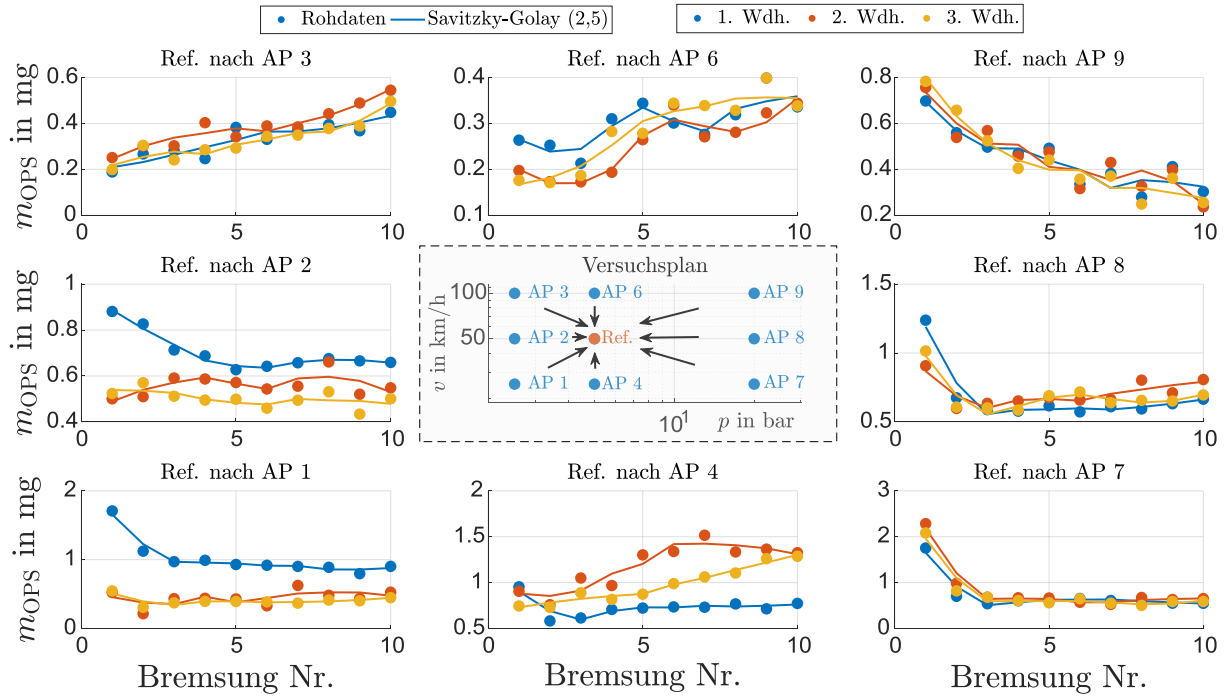


Abbildung 30: Verlauf der emittierten PM_{10} -Masse m_{OPS} über der Anzahl an Bremsungen während der Adaption vom jeweiligen Arbeitspunkt zum Referenzpunkt. Grauguss, glatt, ECE

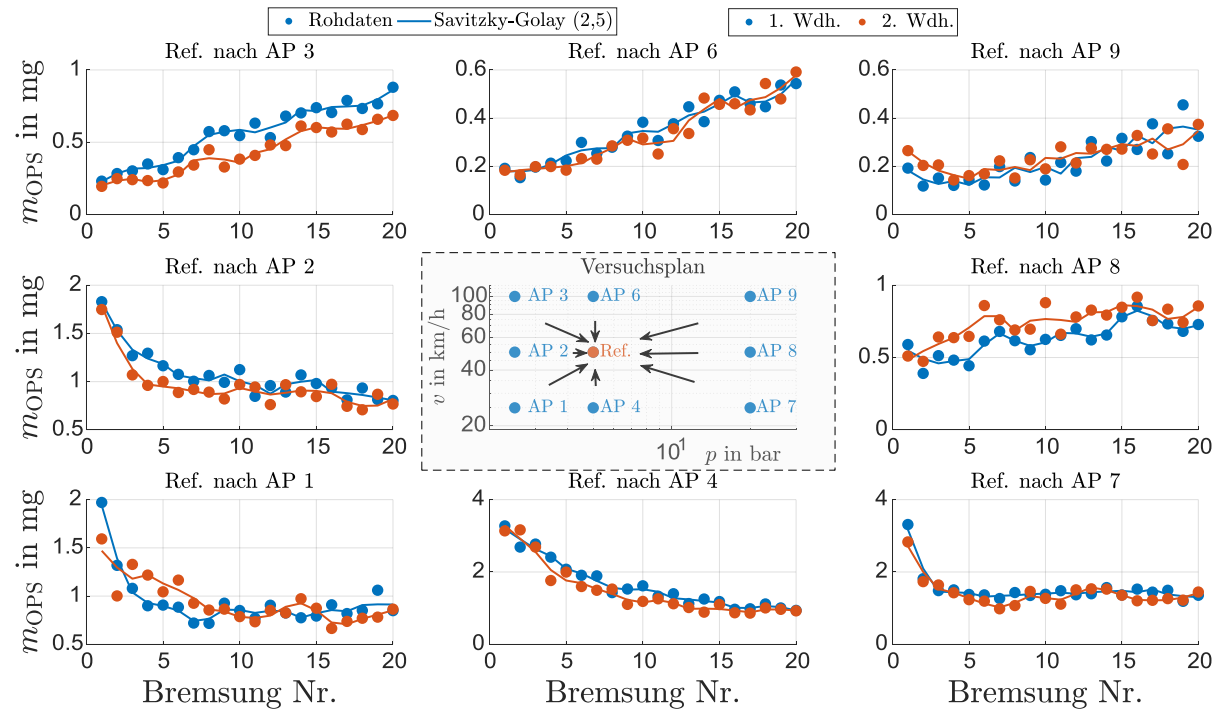


Abbildung 31: Verlauf der emittierten PM_{10} -Masse über der Anzahl an Bremsungen während der Adaption vom jeweiligen Arbeitspunkt zum Referenzpunkt. Grauguss, gelocht, ECE

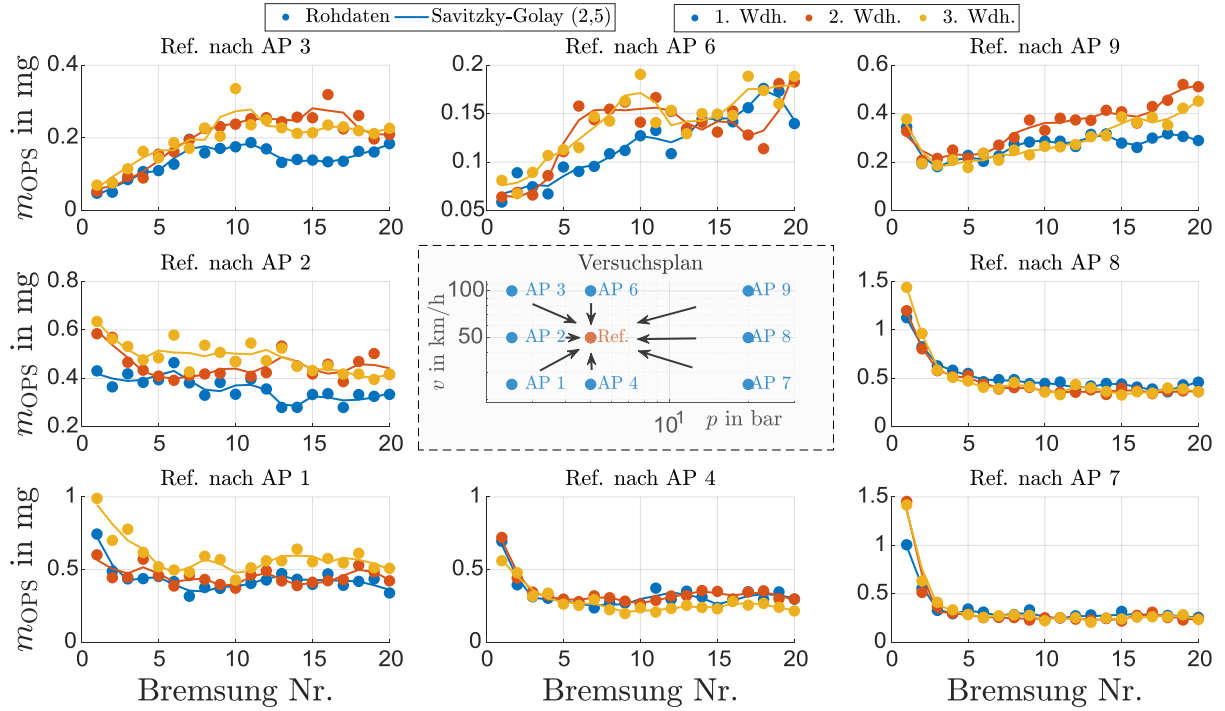


Abbildung 32: Verlauf der emittierten PM_{10} -Masse m_{OPS} über der Anzahl an Bremsungen während der Adaption vom jeweiligen Arbeitspunkt zum Referenzpunkt. Grauguss, glatt, NAO

Zur Überprüfung der Hypothese, dass sich das Adaptionsverhalten mit diesem Ansatz annähern lässt, dient die Darstellung der emittierten Partikelmasse m_{ges} über der negativen Änderung der Masse pro Bremsung Δm (siehe Abbildung 33). Diese Darstellungsweise ist darin motiviert, dass ein PT1-Glied hierin eine Gerade mit der Steigung τ_{Adapt} und dem y-Achsenabschnitt m_0 darstellt:

$$m_B(t_B) = m_0 - \tau_{\text{Adapt}} \cdot \Delta m_B(t_B) \quad 6.2$$

Die Datenpunkte der Zeitverläufe in Abbildung 32 wurden in die Darstellung von Abbildung 33 übertragen und mittels Regressionsgeraden der Form 6.2 angenähert. In den Legenden sind die jeweiligen Zeitkonstanten und Bestimmtheitsmaße der Regressionen aufgeführt. Das Bestimmtheitsmaß weist Werte zwischen 0,077 bis 0,97 auf, was dem augenscheinlichen Eindruck entspricht, dass manche Zeitverläufe einen exponentiellen, asymptotischen Verlauf aufweisen und andere Zeitverläufe nicht hinreichend durch diese Beschreibung anzunähern sind. Die Zeitkonstanten der Regressionen mit einem Bestimmtheitsmaß größer 0,5 liegen zwischen 1,2 und 2,1 Bremsungen multipliziert mit der Bremsdauer von 5 s. Diese Zeitkonstante gibt die Anzahl an Bremsungen multipliziert mit der Bremsdauer von 5 s an, innerhalb derer 63 % der Emissionsüberhöhung gemäß des PT1-Beschreibungsansatzes „abgebaut“ sind.

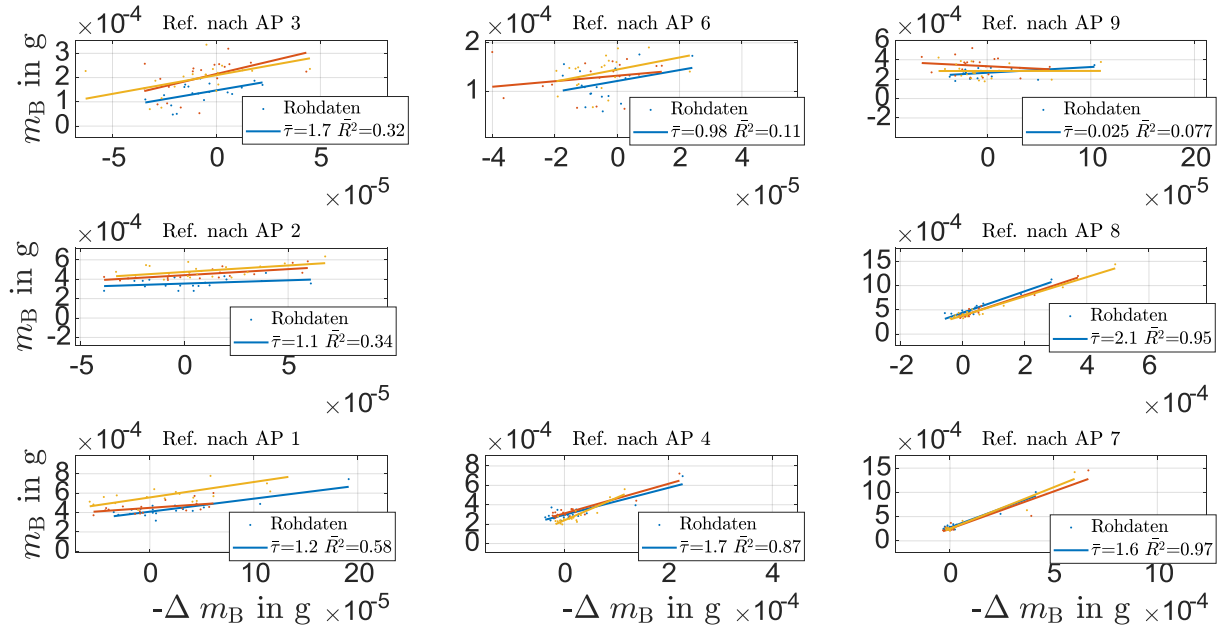


Abbildung 33: Regression der in Abbildung 6 dargestellten Massen pro Bremsung über der Änderung der Gesamtpartikelzahl pro Bremsung. Eine ideale lineare Regression würde einem PT1-Glied entsprechen.

Zur weitergehenden Analyse, in welchen Fällen das PT1-Modell hohe bzw. niedrige Bestimmtheitsmaße aufweist, wird Abbildung 34 herangezogen. In dieser sind die Bestimmtheitsmaße der PT1-Regression über der maximalen adaptionsbedingten Emissionsüberhöhung aufgetragen. Die Abbildung zeigt einen Trend von großen Bestimmtheitsmaßen bei hohen Emissionsüberhöhungen auf. Das PT1-Modell erweist sich in diesen Fällen als adäquate Näherung, wohingegen es in Fällen mit sehr geringen Adaptionsseffekten keine hinreichend gute Näherung darstellt.

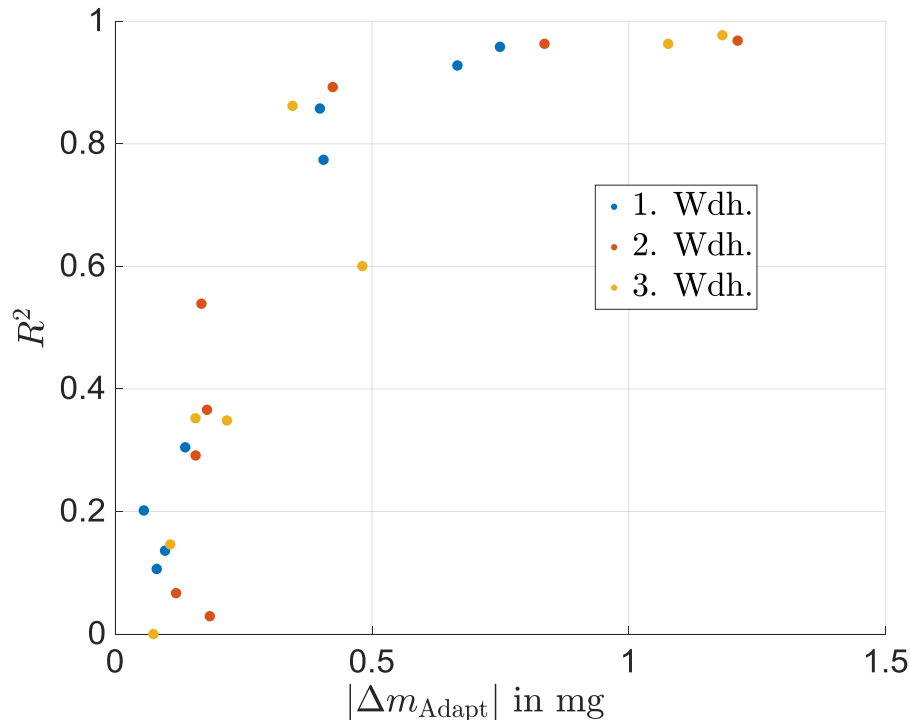


Abbildung 34: Regressionsgüte des exponentiellen Erklärungsansatzes in Abhängigkeit der adaptionsbedingten Emissionsüberhöhung bzw. -verringierung

6.2.2 Ergebnisse der Einzelvariation

Zur weitergehenden Klärung der Frage, nach welchen Mustern bzw. in Abhängigkeit welcher Einflussgrößen temporäre Emissionsüberhöhungen oder -verringierungen auftreten, wird nachfolgend je eine Einzelvariation der Geschwindigkeits- und Druckhistorie als Untersuchungsmethode herangezogen (siehe Abschnitt 4.3.2). Entsprechend des vorangegangenen Abschnitts sind die emittierten Partikelmassen pro Bremsung über der Anzahl an Bremsungen im Referenzpunkt aufgetragen (Abbildung 35). Die Arbeitspunkte 1 (36 km/h) & 2 (42 km/h) weisen niedrigere Geschwindigkeiten auf als der Referenzblock, wohingegen die Arbeitspunkte 4 (59 km/h) bis 9 (135 km/h) durch höhere Geschwindigkeiten gekennzeichnet sind. Nach der niedrigeren Geschwindigkeit in Arbeitspunkt 1 (36 km/h) erfolgt ein abfallender Trend im Referenzblock (siehe obere Reihe, 1. Diagramm von links). Für den Referenzblock nach Arbeitspunkt 2 (42 km/h) ist im Rahmen der Streuung kein eindeutiger Trend zu beobachten, wohingegen alle Referenzblöcke mit

hoher Geschwindigkeitshistorie (AP 4: 59 km/h bis AP 9: 135 km/h) einen ansteigenden Verlauf aufweisen.

Zur Visualisierung dieser Beobachtung ist in Abbildung 36 die temporäre Emissionsüberhöhung bzw. -verringerung über der Geschwindigkeit des Vorgängerarbeitspunkts aufgetragen, die einen nahezu monotonen Anstieg der temporären Emissionsverringerung über der Vorgängergeschwindigkeit aufzeigt.

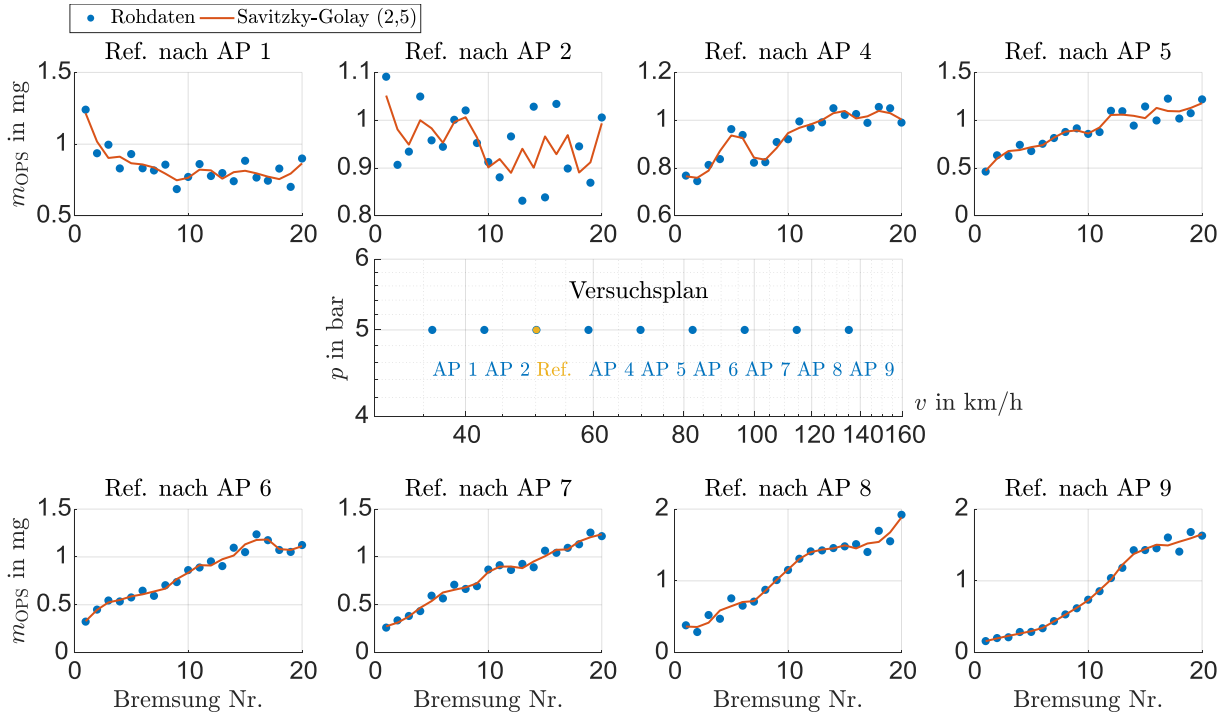


Abbildung 35: Zeitverläufe der emittierten Partikelmasse pro Bremsung für 8 Blöcke à 20 Schleppbremsungen im Referenzpunkt mit unterschiedlichen Geschwindigkeitshistorien (Arbeitspunkte 1-9)

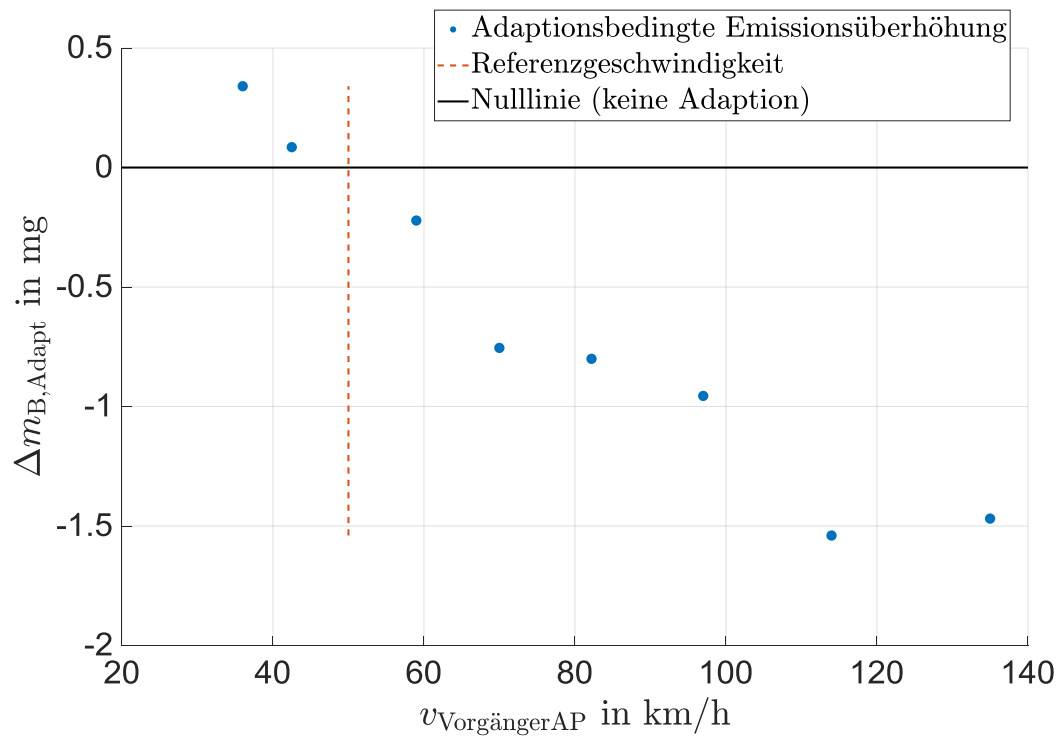


Abbildung 36: Emissionsüberhöhung oder -verringierung der emittierten Partikelmasse pro Bremsung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitshistorie. $\Delta m_{\text{B,Adapt}} = m_{\text{B}}(20) - m_{\text{B}}(1)$

Analog zur vorangegangenen Betrachtung der Geschwindigkeitshistorie enthält Abbildung 37 die Zeitverläufe der Referenzblöcke mit verschiedenen Vorgängerbremsdrücken. Im Gegensatz zur Geschwindigkeitshistorie führen die meisten Arbeitspunkte zu keinem eindeutigen zeitlichen Trend, sondern lediglich zu einer Streuung um einen festen Wert oder zu „hakenförmigen“ Zeitverläufen, die auf gegenläufige Effekte hindeuten. Ausschließlich in den Arbeitspunkten 5, 8 und 9 sind eindeutige Trends zu beobachten. In Abbildung 38 treten diese beiden höchsten Druckhistorien durch die höchsten Emissionsüberhöhungen im Referenzblock hervor, wohingegen Druckhistoriendifferenzen kleiner 20 bar lediglich in kleinerem Maße zu temporären Emissionsänderungen beitragen. Um in diesem Zusammenhang kleine, aber reproduzierbare Effekte von zufälligen Streuungen eindeutig zu unterscheiden, sind weitere Wiederholungsmessungen zielführend.

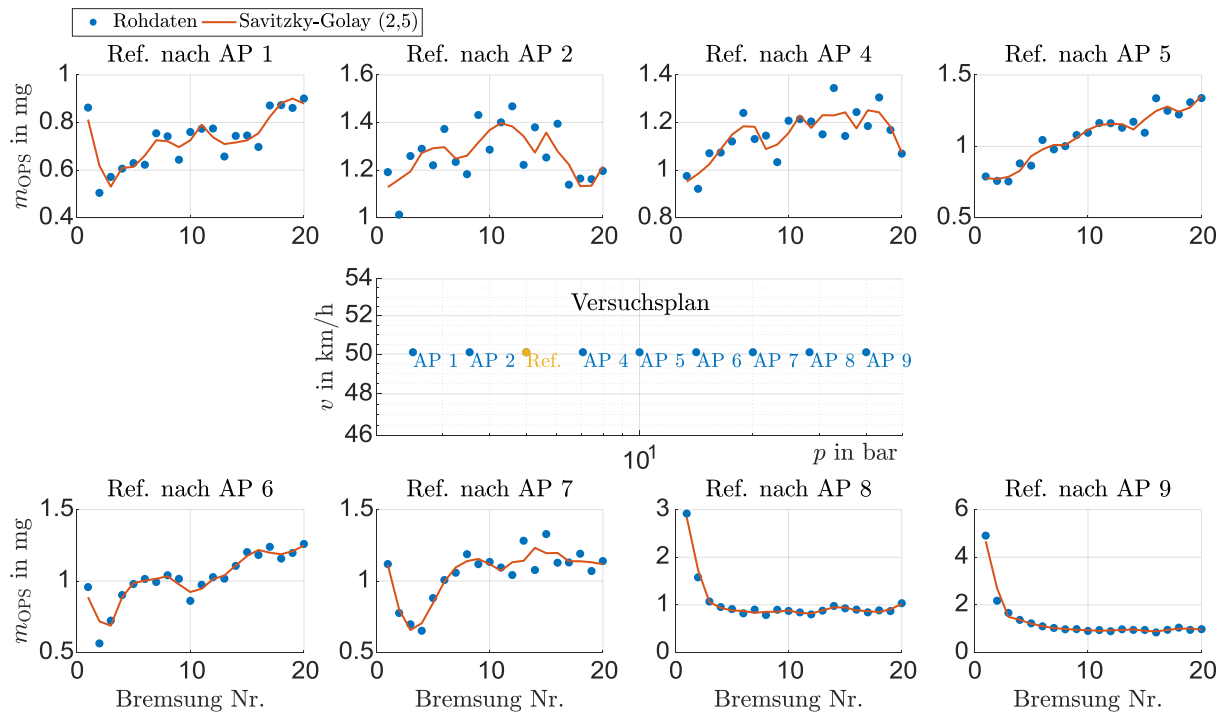


Abbildung 37: Zeitverläufe der emittierten Partikelmasse pro Bremsung für 8 Blöcke á 20 Schleppbremsungen im Referenzpunkt mit unterschiedlichen Bremsdruckhistorien (Arbeitspunkte 1-9)

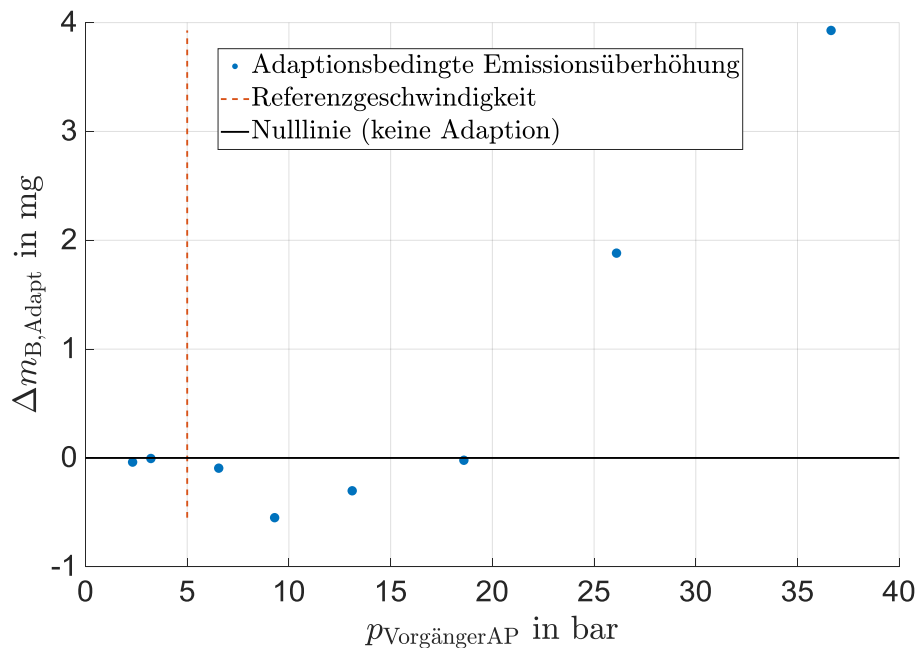


Abbildung 38: Temporäre Emissionsüberhöhung oder -verringierung der emittierten Partikelmasse pro Bremsung in Abhängigkeit von der Bremsdruckhistorie. $\Delta m_{B,\text{Adapt}} = m_B(20) - m_B(1)$

6.2.3 Diskussion und Zwischenfazit

Die Ergebnisse zur vollfaktoriellen Untersuchung der Reibhistorie zeigen auf, dass das aus dem Stand der Forschung qualitativ bekannte Phänomen von Adaptionseffekten innerhalb eines Schwungmassenprüfstandversuchs in quantitativer Weise nachgewiesen und mathematisch beschrieben werden kann. Im Rahmen der Einzelvariation wurde insbesondere die Geschwindigkeit als Einflussgröße für temporäre Emissionsüberhöhungen oder -verringierungen identifiziert. Diese Beobachtung könnte durch einen Erklärungsansatz von Ostermeyer und Kijanski¹¹⁴ verstanden werden. Dieser Ansatz, bekannt als Reservoirmodell, beschreibt die Belagkavitäten als Speicher für Verschleißpartikel. Ostermeyer und Kijanski nennen hohe Geschwindigkeiten als ursächlichen Mechanismus zur Leerung von Kavitäten, wohingegen niedrige Geschwindigkeiten die Einlagerung von Verschleißpartikeln begünstigen.

Zur Überprüfung des Modells werden nachfolgend Mikroskopaufnahmen an neun definierten Positionen des Belages unter Seitlicht herangezogen. Analog zu den Untersuchungen von Ostermeyer und Kijanski findet ein Versuchsplan mit Blöcken von 30 Schleppbremsungen Anwendung, die bei 38 bar und 80 km/h bzw. anschließend bei 38 bar und 30 km/h temperaturgesteuert erfolgen. Der von Ostermeyer und Kijanski verwendete Bremsdruck von 30 bar wurde entsprechend den Angaben einer vorherigen Veröffentlichung¹¹⁵ im Sinne einer äquivalenten Flächenpressung auf 38 bar umgerechnet. Wie von Ostermeyer

¹¹⁴ Ostermeyer, G.-P.; Kijanski, J.: Surface Reservoir Dynamics in Friction Interfaces (2019).

¹¹⁵ Ostermeyer, G. P.; Wilkening, L.: Experimental Investigations of the Topography in Pads (2013), S. 1400.

und Kijanski mit Mikroskopaufnahmen und Oberflächenvermessung zuvor bereits in Tribometerversuchen beobachtet, weist die Belagoberfläche nach den niedrigen Geschwindigkeitsblöcken eine homogene, helle Oberfläche auf (Abbildung 41), wohingegen der Belag nach dem 80 km/h-Block (Abbildung 39) eine zerklüftete, raue Oberfläche aufweist. Zur Prüfung der Vermutung, dass die „Zerklüftungen“ bzw. Belagkavitäten der Oberfläche durch Verschleißpartikel im Sinne eines Reservoirs gefüllt wurden und somit die Ursache für die helle, homogene Oberfläche in Abbildung 41 sind, wurde im Anschluss an die ersten Mikroskopaufnahmen eine Druckluftreinigung der Oberfläche durchgeführt und die Mikroskopaufnahmen wiederholt (Abbildung 40 und Abbildung 42). Diese Aufnahmen weisen unabhängig von der vorangegangenen Geschwindigkeit eine in noch stärkerem Maße als in Abbildung 39 zerklüftete Oberfläche auf. Durch die Druckluftreinigung wurde somit die homogene, helle Oberfläche nach dem 30 km/h-Block offensichtlich von Verschleißpartikeln gereinigt.

Diese Beobachtung steht mit dem Reservoirmodell in Einklang und bekräftigt somit die Ergebnisse von Ostermeyer und Kijanski erstmals in einem Schwungmassenprüfstandsversuch. Zudem stellt diese Beobachtung ein weiteres Indiz dafür dar, dass die geschwindigkeitsbedingten Emissionsüberhöhungen und Leerungen zu einem Großteil auf Leerungs- bzw. Fülleffekte des Reservoirs in den Belagkavitäten zurückzuführen sind.

Nach 30 Bremsungen mit 80 km/h 38 bar vor Druckluftreinigung

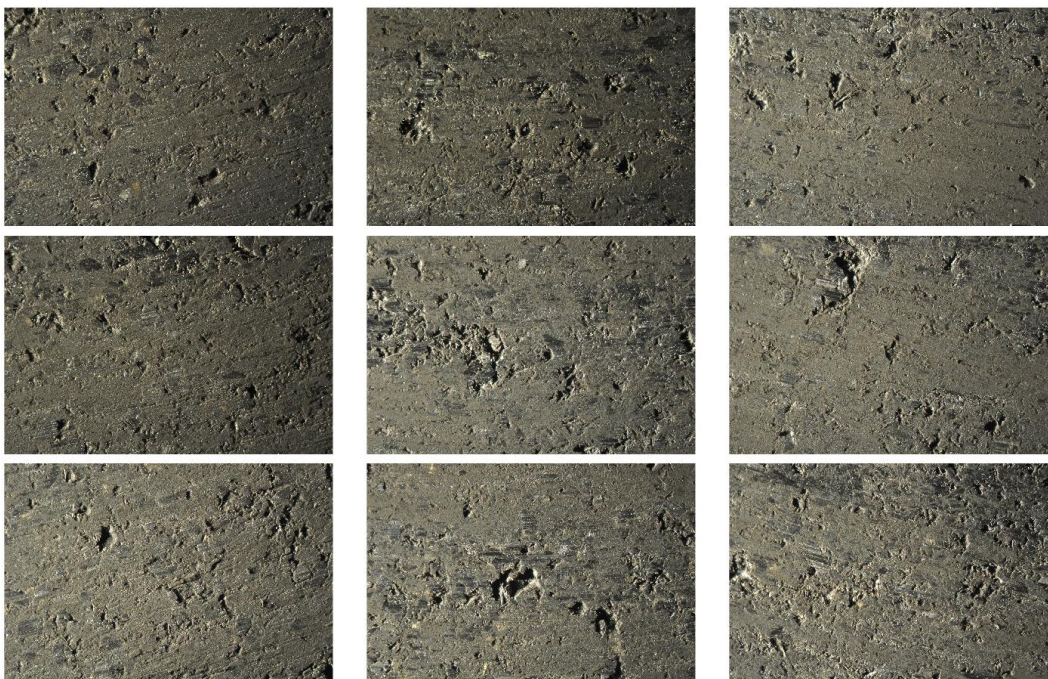


Abbildung 39: Mikroskopaufnahmen an neun definierten Ausschnitten der Belagoberfläche eines ECE-Belages nach einem Block mit 30 Schleppbremsungen bei 80 km/h und 38 bar, angelehnt an die Tribometeruntersuchungen von Ostermeyer^{116 117 118} und Kijanski

¹¹⁶ Ostermeyer, G.-P.; Kijanski, J.: Surface Reservoir Dynamics in Friction Interfaces (2019).

Nach 30 Bremsungen mit 80 km/h 38 bar nach Druckluftreinigung

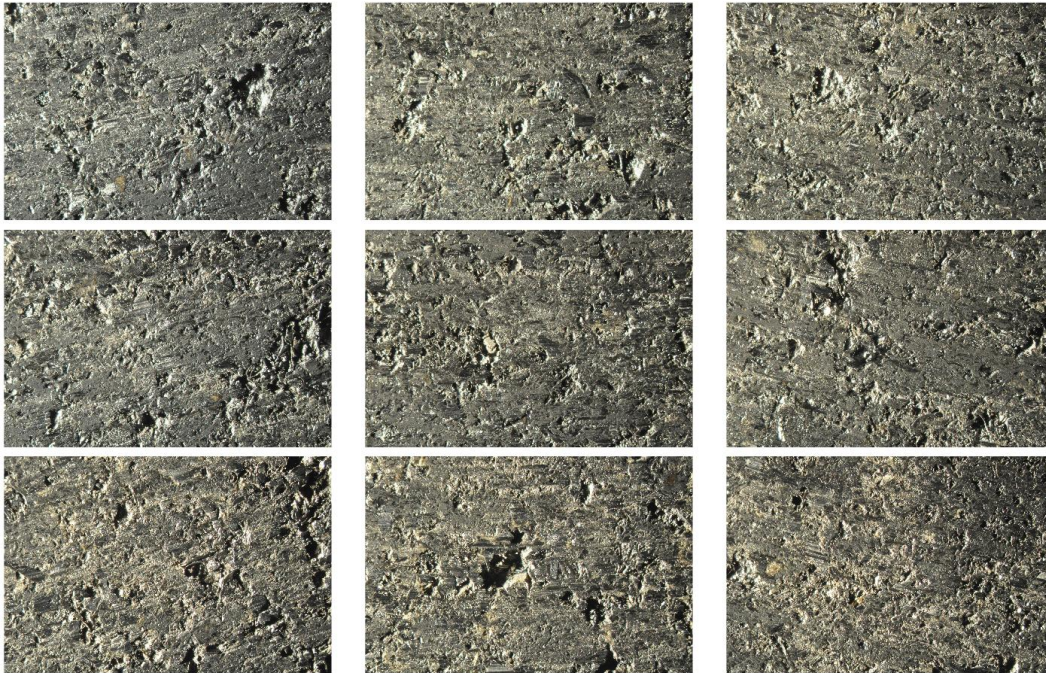


Abbildung 40: Mikroskopaufnahmen an neun definierten Ausschnitten der Belagoberfläche eines ECE-Belages nach einem Block mit 30 Schleppbremsungen bei 80 km/h und 38 bar und anschließender manueller Reinigung mittels Druckluft

Nach 30 Bremsungen mit 30 km/h 38 bar vor Druckluftreinigung

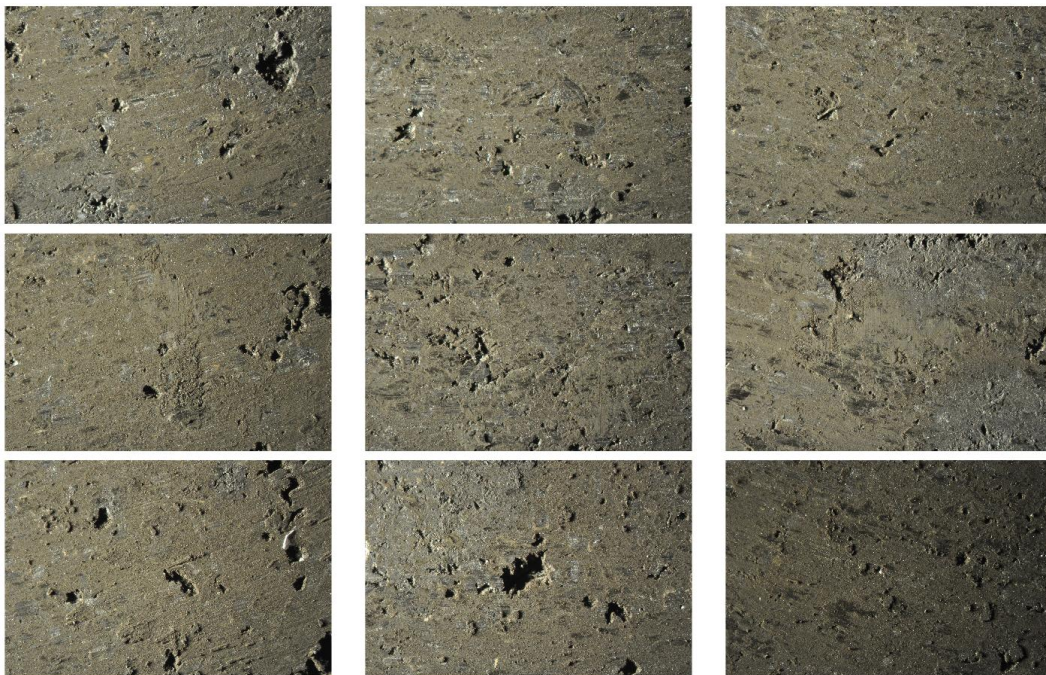


Abbildung 41: Mikroskopaufnahmen an neun definierten Ausschnitten der Belagoberfläche eines ECE-Belages nach einem Block mit 30 Schleppbremsungen bei 80 km/h und 38 bar

¹¹⁷ Ostermeyer, G. P.; Wilkening, L.: Experimental Investigations of the Topography Dynamics (2013).

¹¹⁸ Ostermeyer, G. P.; Müller, M.: Surface Topography and Wear Dynamics of Brake Pads.

Nach 30 Bremsungen mit 30 km/h 38 bar nach Druckluftreinigung

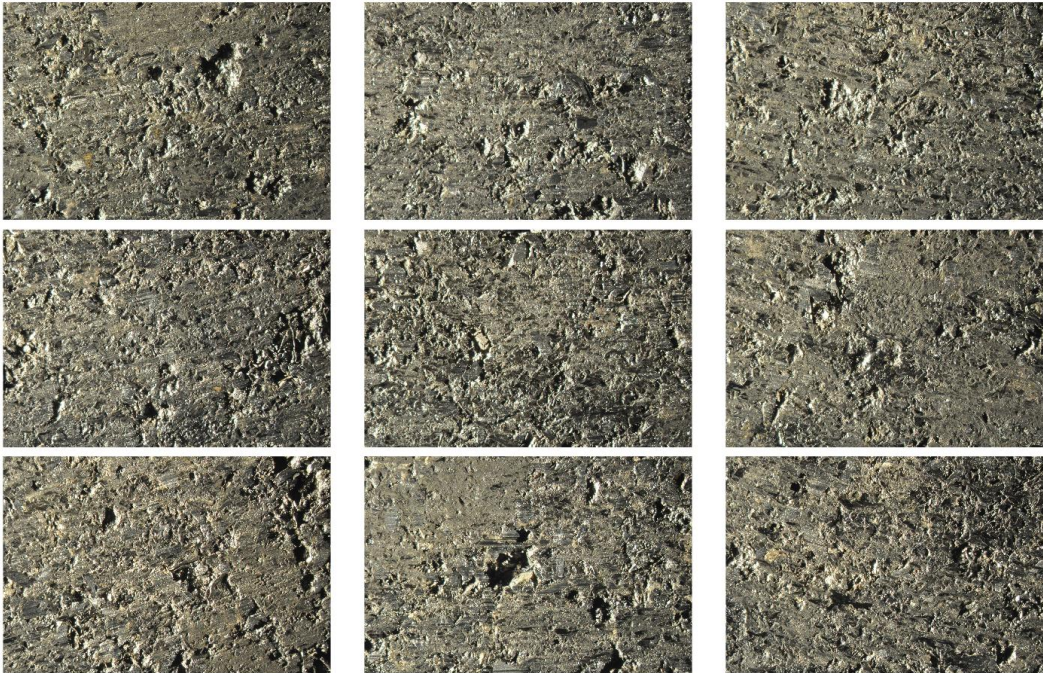


Abbildung 42: Mikroskopaufnahmen an neun definierten Ausschnitten der Belagoberfläche eines ECE-Belages nach einem Block mit 30 Schleppbremsungen bei 30 km/h und 38 bar und anschließender manueller Reinigung mittels Druckluft

6.3 Bremsdruck und -geschwindigkeit

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Einflussgrößenanalyse hinsichtlich Druck- und Geschwindigkeit zusammengefasst. Wie im Abschnitt zur Untersuchungsmethodik (4.3.3) beschrieben stellen drei Experimente die Datengrundlage für diese Analyse dar:

1. AP-Wechsel-Kennfeld
2. AP-Block-Kennfeld
3. WLTP-Zyklus

Als Bewertungsgrößen für die Emission werden wie in Abschnitt 4.1 hergeleitet die Massenkonzentration (feine und grobe Fraktion), Anzahlkonzentration (ultrafeine bis grobe Fraktion) sowie die Anzahl- und Massengrößenverteilung in der feinen und groben Fraktion herangezogen.

6.3.1 Massenkonzentration

Abbildung 43 stellt die Mittelwerte der Massenkonzentration pro Bremsung in der Kennfeldvermessung des „AP-Wechsel-Kennfeldes“ in räumlicher Darstellung über Druck und Geschwindigkeit gemeinsam mit der Temperatur als Farbkodierung dar. Der dominante Einfluss der Geschwindigkeit gegenüber dem Effekt des Bremsdrucks ist bereits in dieser

räumlichen Darstellung zu erkennen. Diese Darstellung der Mittelwerte wird im Kapitel 8.1 zur Modellbildung aufgegriffen.

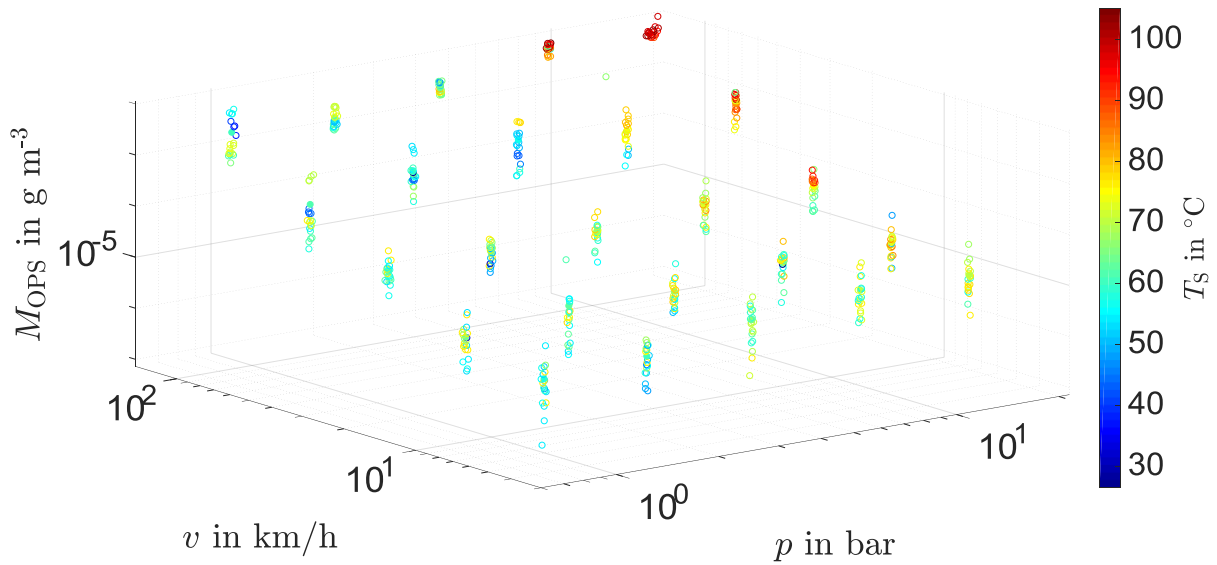


Abbildung 43: Mittelwerte der Massenkonzentration pro Bremsung, gemessen mit dem OPS in den je 20 Wiederholungen der 25 Arbeitspunkte des „AP-Wechsel-Kennfeldes“

Zur Quantifizierung dieser qualitativen Erkenntnis sind in Abbildung 44 die Massenkonzentrationswerte pro Arbeitspunkt auf Kurven gleichen Bremsdrucks bzw. gleicher Geschwindigkeit über der Geschwindigkeit bzw. über dem Bremsdruck aufgetragen. Zudem sind hypothetische, lineare, quadratische und kubische Zusammenhänge eingezeichnet, um die Sensitivität der gemessenen Konzentrationen in Bezug auf die Einflussgrößen einzuordnen. Während die Massenkonzentration bei Verzehnfachung der Geschwindigkeit um Faktor 1000 ansteigt, erhöht sie sich bei Verzehnfachung des Bremsdruckes um maximal eine Größenordnung.

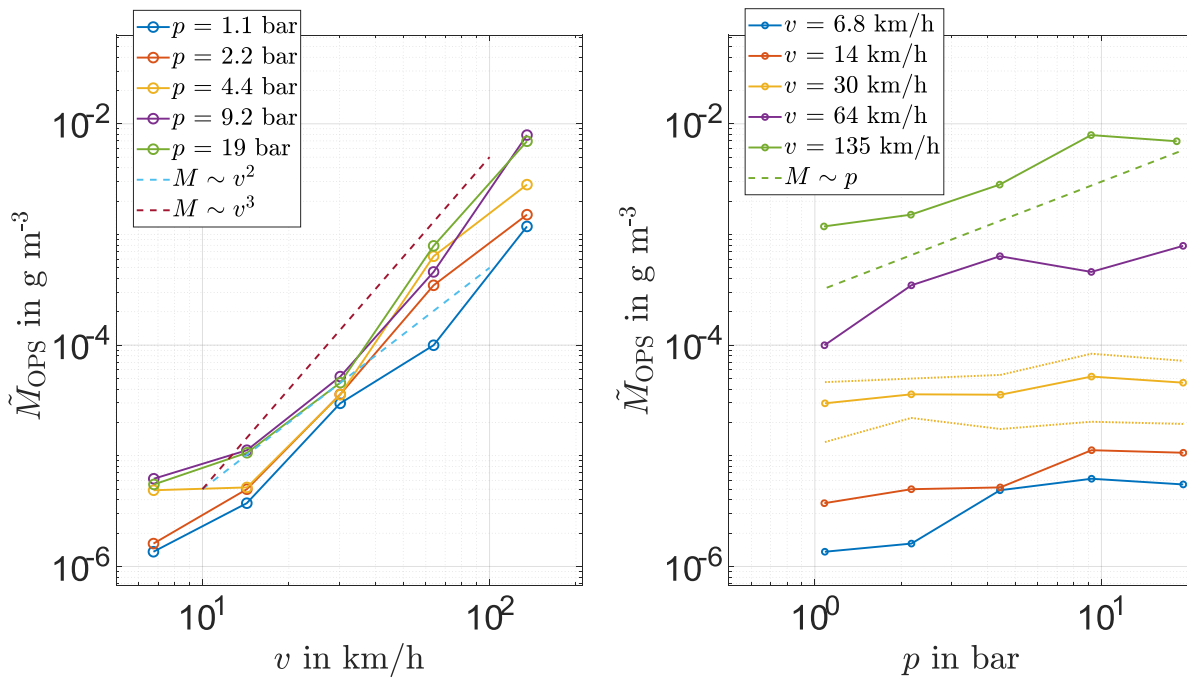


Abbildung 44: Mediane der Massenkonzentration gemessen im „AP-Wechsel-Kennfeld“ über Geschwindigkeit und Bremsdruck.

Die gleiche Darstellungsweise für die Messdaten des „AP-Block-Kennfeldes“ ist in Abbildung 45 aufgetragen. Wie im „AP-Wechsel-Kennfeld“ tritt ebenfalls ein näherungsweise quadratischer bis kubischer Geschwindigkeitseinfluss v^2 bis v^3 und ein näherungsweise linearer Effekt des Bremsdruckes auf.

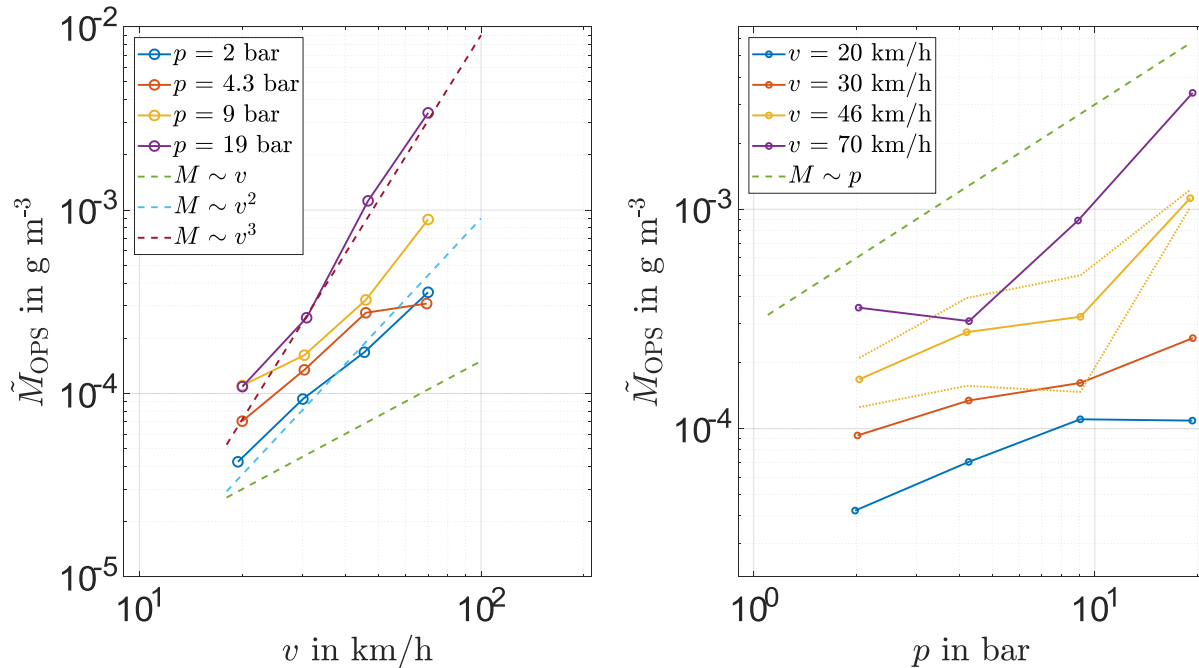


Abbildung 45: Mediane der Massenkonzentration gemessen im „AP-Block-Kennfeld“ über Geschwindigkeit und Bremsdruck.

Der quantitative Vergleich beider Kennfelder (Abbildung 46) zeigt jedoch, dass insbesondere die niedrigen Geschwindigkeitswerte im „AP-Block-Kennfeld“ zum Teil eine Größenordnung größer als die des „AP-Wechsel-Kennfeldes“ sind. Die Ursache für diese Differenz bleibt offen, jedoch verdeutlicht dieses Ergebnis das zeitvariante Emissionsverhalten von Scheibenbremsen, das von der Reibhistorie (in diesem Fall die Reihenfolge der Kennfeldbremsungen) beeinflusst wird, da alle anderen Versuchsparameter identisch sind.

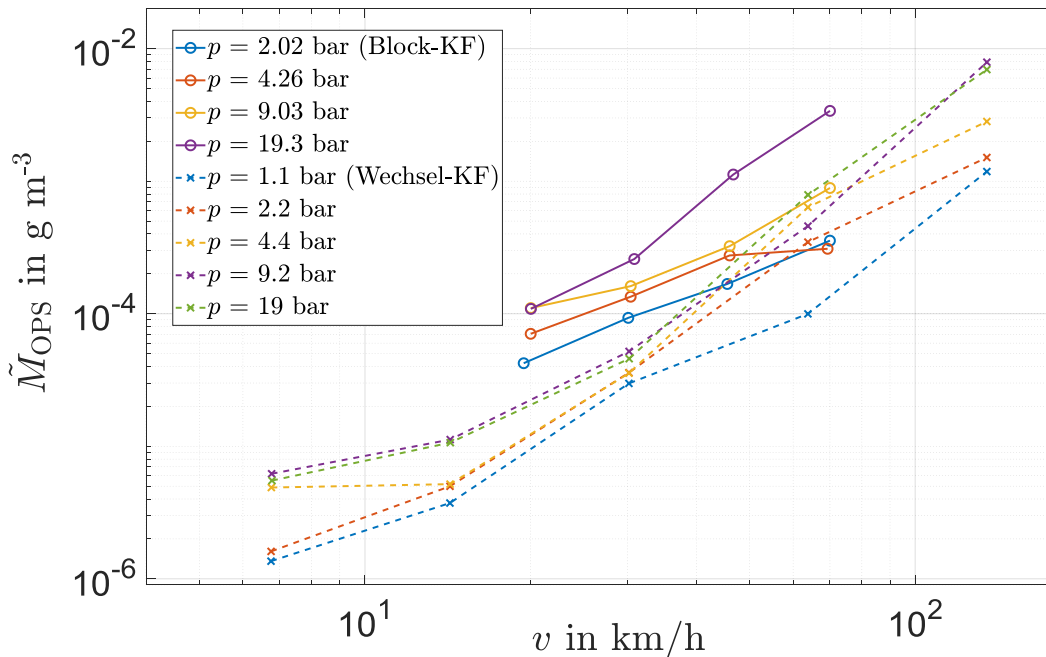


Abbildung 46: Mediane der Konzentration über der Geschwindigkeit, gemessen im „AP-Wechsel-Kennfeld“ (gestrichelte Linie mit Kreuzen) sowie im „AP-Block-Kennfeld“ (durchgezogene Linie mit Kreisen) im Vergleich.

6.3.2 Anzahlkonzentration

Abbildung 47 stellt die mittlere Anzahlkonzentration pro Arbeitspunkt im „AP-Wechsel-Kennfeld“ dar, die mit OPS (links) und CPC (rechts) gemessen wurden. Der Messbereich des OPS beträgt 0,3 bis 10 μm , wohingegen der CPC ab 2,5 nm misst. In der oberen Reihe sind die Konzentrationen über der Geschwindigkeit aufgetragen und in der unteren Reihe über dem Bremsdruck. Die mit dem OPS gemessene Anzahlkonzentration steigt bei Verzehnfachung der Geschwindigkeit um den Faktor 1000 an. Dieses Verhalten entspricht bezüglich der Größenordnung einem kubischen Zusammenhang. Bezüglich des Bremsdruckes besteht eine geringere Sensitivität, die quantitativ zum Teil sogar kleiner als bei einem linearen Zusammenhang ist.

Die Anzahlkonzentrationen von OPC und CPC verlaufen hinsichtlich oben genannter Kriterien qualitativ und quantitativ sehr ähnlich. Hiervon ausgenommen sind Werte bei Geschwindigkeiten unterhalb von 20 km/h, die bei der CPC-Messung von der Hintergrundkonzentration überlagert sind. Zudem weisen die beiden höchsten Bremsdrücke bei 135 km/h höhere Konzentrationen auf als beim OPS. Eine direkte Gegenüberstellung von

OPS- und CPC-Konzentration findet sich in Abbildung 48. Diese Darstellung zeigt auf, dass die beiden Sensoren trotz verschiedener unterer Messbereichsgrenzen (Faktor 100: 2,5 nm zu 300 nm) quantitativ sehr ähnliche Anzahlkonzentrationen messen. Dies deutet darauf hin, dass innerhalb der Kennfeldversuche lediglich mechanisch generierte Partikel (feine und grobe Fraktion) emittiert wurden und bestätigt wie aus dem Stand der Forschung¹¹⁹ bekannt, dass die dominante Einflussgröße für die Generierung ultrafeiner Partikel die Temperatur ist, da die hier diskutierten Kennfeldversuche bei niedrigen Temperaturen von ca. 80 bis 100 °C stattfinden.

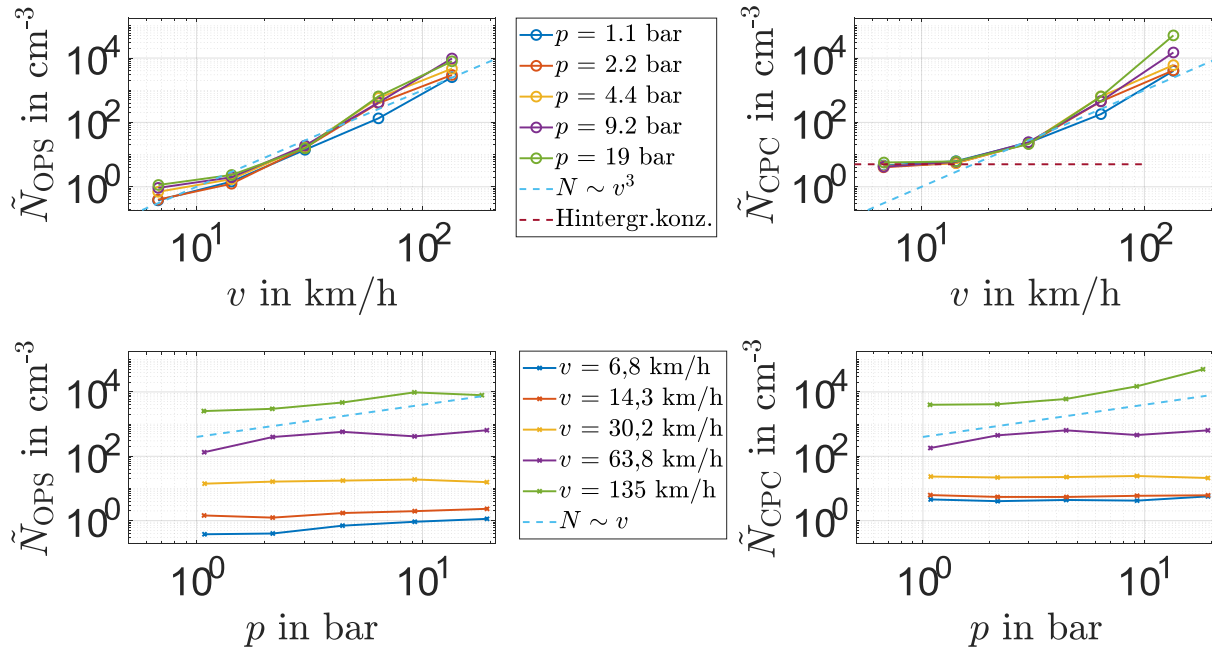


Abbildung 47: Median der Anzahlkonzentration pro Arbeitspunkt, gemessen im „AP-Wechsel-Kennfeld“ mit OPS (links) und CPC (rechts). Darstellung über der Geschwindigkeit (oben) und über dem Bremsdruck (unten).

¹¹⁹ Asbach, C. et al.: Entstehung und Messung von Fein- und Ultrafeinstaub beim Bremsen (2018).

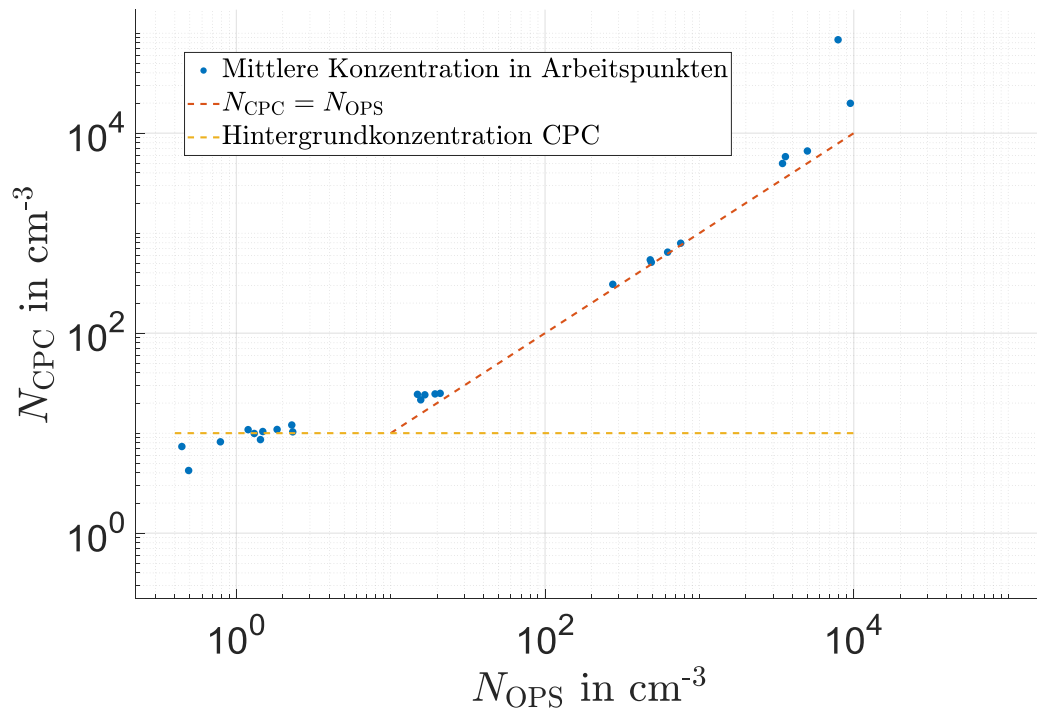


Abbildung 48: Mittlere Anzahlkonzentration pro Arbeitspunkt, gemessen im „AP-Wechsel-Kennfeld“ mit OPS (x-Achse) und CPC (y-Achse). Oberhalb der Hintergrundkonzentration des CPC liegen die Konzentrationen nahe einer Geraden mit der Steigung 1.

6.3.3 Größenverteilung

Abbildung 49 stellt den Zusammenhang zwischen Massen- und Anzahlkonzentration grafisch dar und nähert die Daten für Punkte gleicher Geschwindigkeit mit je einer proportionalen Regression an (rechtes Diagramm). Der Vergleich dieser empirischen Proportionalitätskonstanten im rechten Diagramm zeigt, dass die Proportionalitätskonstanten mit steigender Geschwindigkeit kleiner werden. Da die Massenkonzentration aus der Anzahlkonzentration pro Größenklasse berechnet wird (siehe Formel in Abbildung 49), legt dies die Vermutung nahe, dass die Größenverteilung von der Geschwindigkeit abhängt.

Zur Überprüfung dieser Vermutung sind in Abbildung 50 und Abbildung 51 die kumulativen Dichtefunktionen der Anzahl- und Massengrößenverteilung im „AP-Block“ und „AP-Wechsel-Kennfeld“ für alle Arbeitspunkte dargestellt. Aus beiden Versuchen geht hervor, dass sich sowohl Anzahl- als auch Massenkonzentration mit steigender Geschwindigkeit zu kleineren Partikelgrößen hin verschieben.

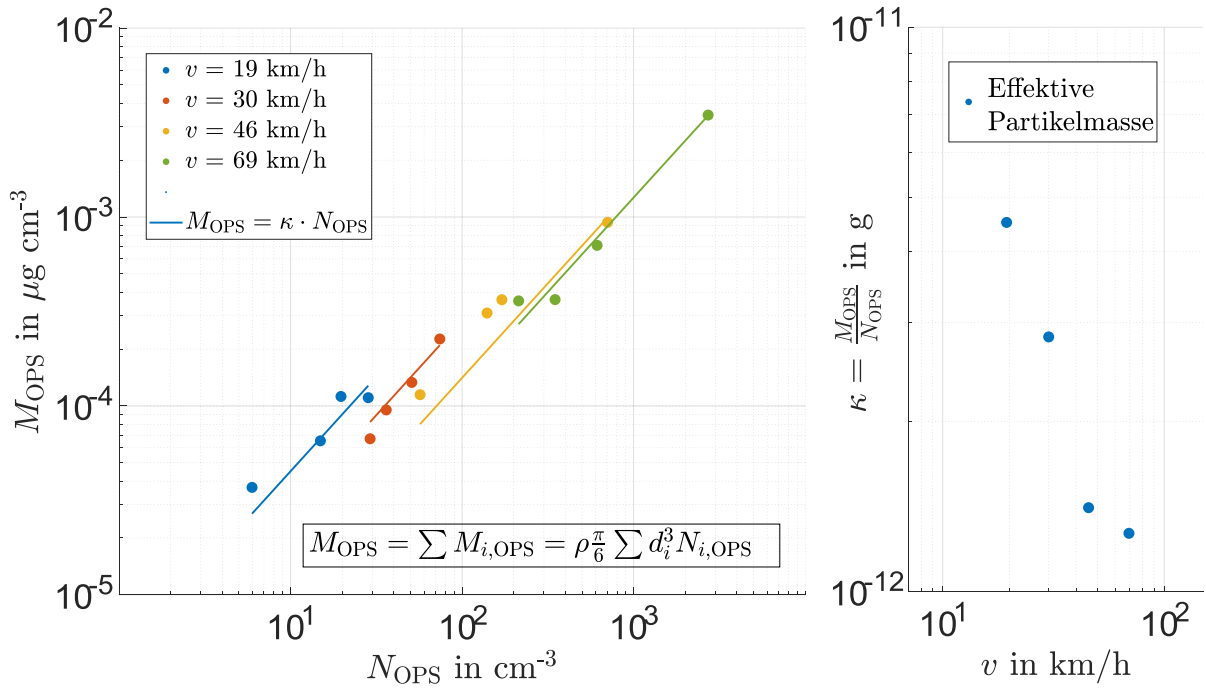


Abbildung 49: Massen- über Anzahlkonzentration für Blöcke gleicher Geschwindigkeit aus der Vermessung des „AP-Block-Kennfeldes“ (links) sowie die per Regression berechnete Proportionalitätskonstante zwischen Massen- und Anzahlkonzentration über der Geschwindigkeit (rechts)

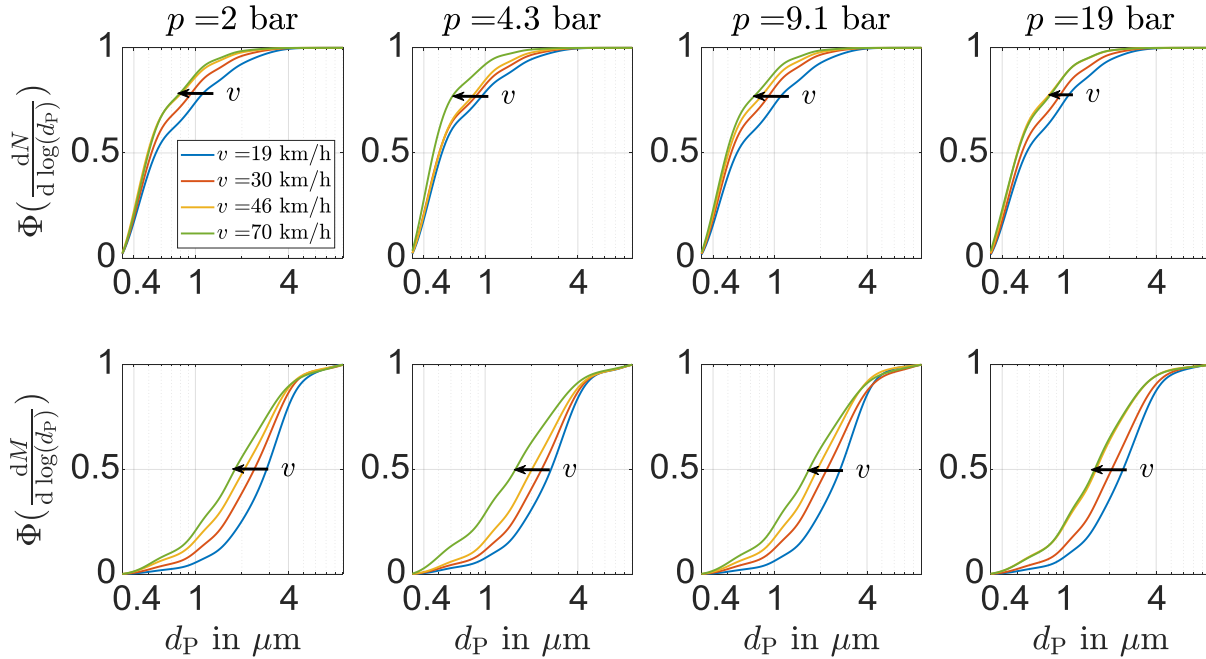


Abbildung 50: Kumulative Dichtefunktion der Anzahl- (oben) und Massengrößenverteilungen im „AP-Block-Kennfeld“ für die vier Bremsdrücke (Spalten) und die vier Geschwindigkeiten (farblich hervorgehobene Kurven).

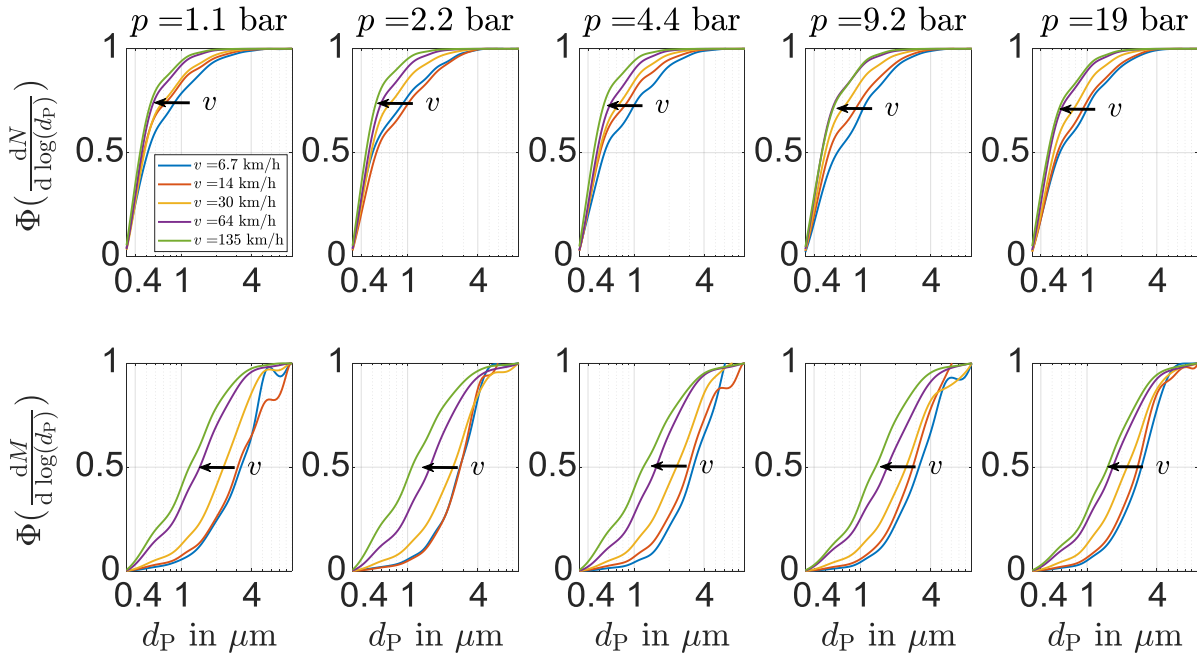


Abbildung 51: Kumulative Dichtefunktion der Anzahl- (oben) und Massengrößenverteilungen im „AP-Wechsel-Kennfeld“ für die fünf Bremsdrücke (Spalten) und die fünf Geschwindigkeiten (farblich hervorgehobene Kurven).

Um dieses Ergebnis zu quantifizieren und um zu überprüfen, ob dieses Phänomen ebenfalls in einem Fahrzyklus auftritt, sind in Abbildung 52 und Abbildung 53 die Quartile der Anzahlgrößenverteilung über der Geschwindigkeit aufgetragen. In diesen Darstellungen tritt sowohl für die beiden Kennfelder als auch für den WLTP der zuvor beobachtete Trend hin zu kleineren emittierten Partikelgrößen bei hohen Geschwindigkeiten auf.

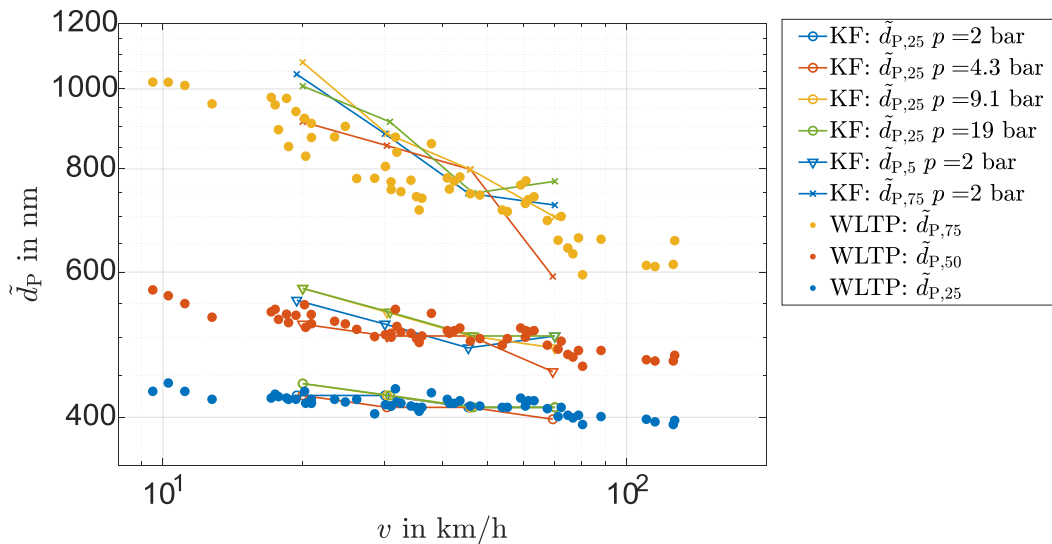


Abbildung 52: Perzentile der Größenverteilung (25 %, 50 %, 75 %) über der Geschwindigkeit im „AP-Block-Kennfeld“ und WLTP im Vergleich, aufgetragen über der Geschwindigkeit

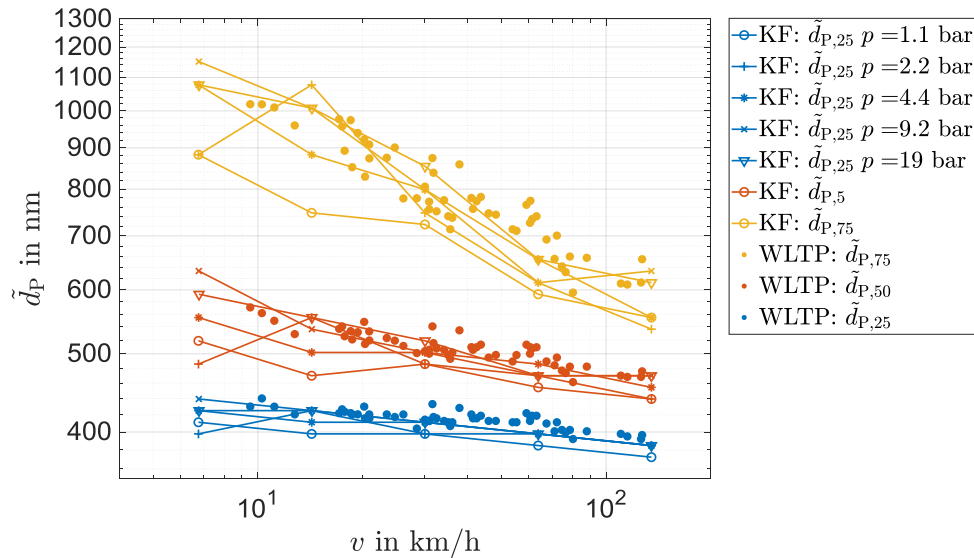


Abbildung 53: Perzentile der Größenverteilung (25 %, 50 %, 75 %) über der Geschwindigkeit im „AP-Wechsel-Kennfeld“ und WLTP im Vergleich, aufgetragen über der Geschwindigkeit

Trägt man die Quartile über der chronologischen Reihenfolge im „AP-Block-Kennfeldversuch“ auf (Abbildung 54), so zeigt sich, dass nach dem Wechsel der Arbeitspunkte ein zeitvariantes Verhalten der Quartile auftritt. Dieses könnte wiederum ein Indiz für ein Reservoirverhalten des Belages sein, wie es in den Abschnitten 6.4 und 7.1 ausführlich diskutiert wird. Das zeitliche Anpassungsverhalten deutet zudem darauf hin, dass es sich beim Phänomen der Größenverschiebung um einen Effekt handelt, der seinen Ursprung beim Emittenten (der Bremse) hat und nicht durch mögliche Partikelverluste in der Einhausung hervorgerufen wird, da diese sprunghaft auftreten müssten und kein Anpassungsverhalten aufweisen dürften.

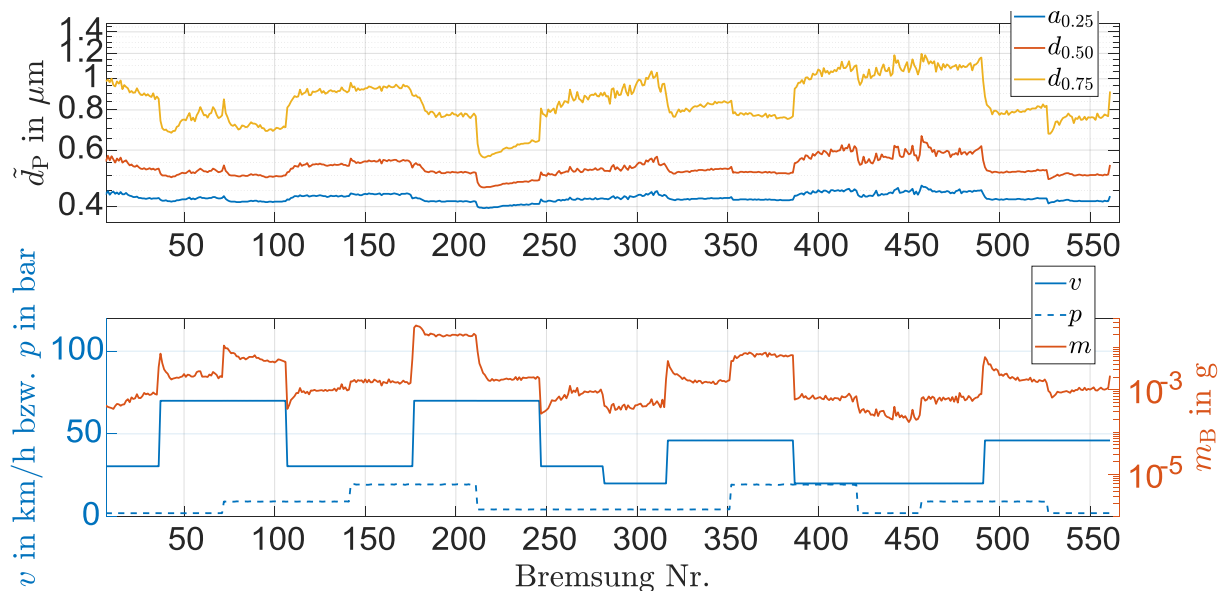


Abbildung 54: Serieller Verlauf der Größenverteilungsperzentile pro Bremsung (oben) und des Bremsdruckes, der Geschwindigkeit sowie der emittierten Masse pro Bremsung (unten). Die 550 Datenpunkte pro Bremsung wurden im Sinne der Übersichtlichkeit zu durchgehenden Linien ohne Marker pro Bremsung zusammengefasst.

6.3.4 Diskussion und Zwischenfazit

Grundlegende Verschleißmodelle nehmen an, dass die Verschleißmasse in abrasiven Reibvorgängen proportional zur Reibarbeit und somit auch zum Reibweg ist¹²⁰, solange die Reibzone frei von Verschleißpartikeln ist, die andernfalls verschleißmindernd wirken. Im Falle einer Schleppbremsung, wie sie in den Kennfeldversuchen Anwendung fand, ist die auf die Zeit normierte Reibarbeit (Reibleistung) proportional zur Reibkraft und Reibgeschwindigkeit. In Bezug auf die Reibkraft entsprechen die Ergebnisse dieser Annahme, jedoch nicht in Bezug auf die Geschwindigkeit. Statt eines linearen Zusammenhangs tritt in drei unabhängigen Experimenten ein überproportionaler Zusammenhang (quadratisch bis kubisch) auf. Dieses Ergebnis findet sich ebenfalls in eigenen WLTP-Versuchen wieder (Abbildung 55), die einen quadratischen Zusammenhang der Massenkonzentration zeigen als auch in Daten aus der Literatur¹²¹ für einen LACT-Zyklus (Abbildung 56), die einen kubischen Zusammenhang der Anzahlkonzentration zeigen.

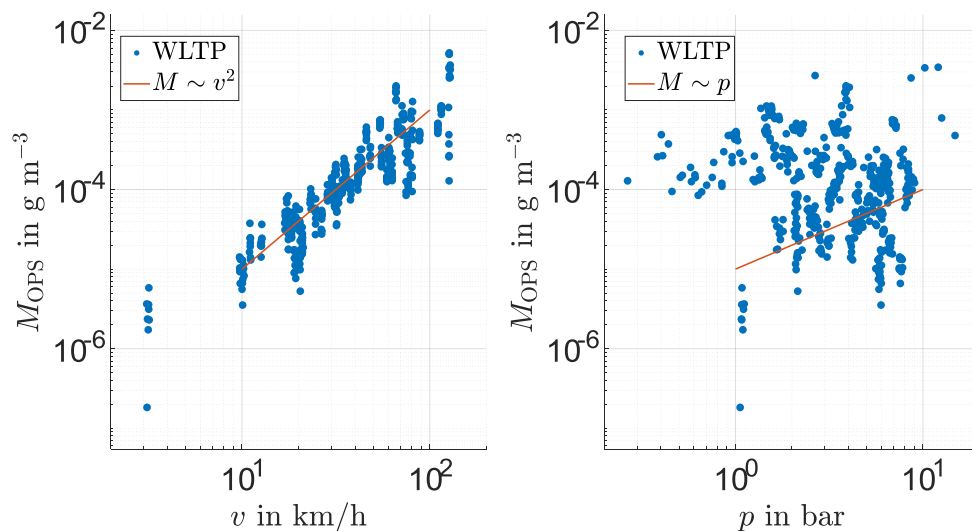


Abbildung 55: Massenkonzentration im WLTP über der Geschwindigkeit (links) und dem Bremsdruck (rechts)

¹²⁰ Popov, V.: Kontaktmechanik und Reibung (2016), S. 305.

¹²¹ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019).

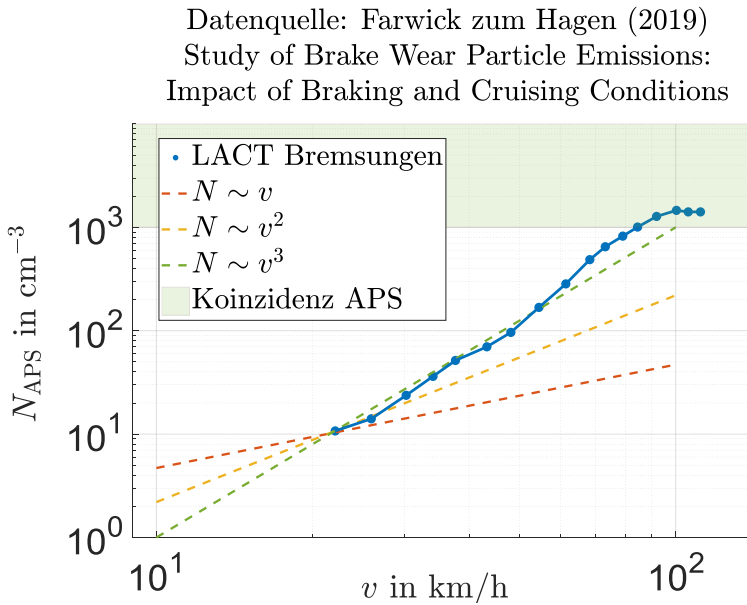


Abbildung 56: Eigene Darstellung der veröffentlichten Daten von Farwick zum Hagen¹²². Anzahlkonzentration gemessen mit einem Aerodynamischen Größenspektrometer (TSI APS) über der Geschwindigkeit in einem Los-Angeles-City-Traffic-Zyklus

Ein möglicher Erklärungsansatz baut darauf auf, dass eine Verschiebung der Größenverteilung in allen drei Experimenten (Kennfelder und WLTP) aufgetreten ist. Diese könnte ein Hinweis darauf sein, dass hohe Drehgeschwindigkeiten das Herauslösen von kleinen Partikeln aus den Kavitäten des Belages (Reservoir) fördern und somit zu einer überproportionalen Emission führen. Dieser Erklärungsansatz ist in Anbetracht des jetzigen Kenntnisstandes lediglich hypothetischer Natur.

Ein anderer ebenfalls hypothetischer Erklärungsansatz besteht darin, dass bei kleinen Geschwindigkeiten mehr große Verschleißpartikel und bei hohen Geschwindigkeiten mehr kleine Verschleißpartikel generiert werden. Die großen Verschleißpartikel könnten oberhalb eines aerodynamischen Durchmessers von $10\ \mu\text{m}$ jedoch nicht mehr den PM_{10} -Impaktor passieren und würden somit abgeschieden. In Abbildung 57 ist dieser Zusammenhang für Kennfeldbremsungen bei kleiner und großer Geschwindigkeit an Hand von Massengrößenverteilungen sowie der Impaktordurchlasskurve visualisiert. Zusätzlich sind hypothetisch errechnete Massengrößenverteilungen für Messungen ohne Impaktor aufgetragen. Diese Hochrechnungen sind mehreren Unsicherheiten unterworfen. Zu diesen Unsicherheiten zählen die unbekannte Unsicherheit der Impaktordurchlasskurve, die unbekannte größenabhängige Partikeldichte sowie die Messunsicherheit der Massengrößenverteilungen an den Messbereichsgrenzen des OPS. Die Hochrechnung dient daher lediglich der Visualisierung des hypothetischen Effektes der geschwindigkeitsabhängigen Abscheidung. Ob und in welchem Maße dieser Erklärungsansatz zum überproportionalen Geschwindigkeitseffekt beiträgt bleibt offen. Dieser Erklärungsansatz für die Diskrepanz zwischen erwarteter Verschleißmasse und PM_{10} -Emission wird in Abschnitt 7.2 weiterge-

¹²² Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019).

hend diskutiert. Ein Versuch zur Untersuchung dieser Hypothese besteht darin, Messungen ohne PM_{10} -Impaktor durchzuführen oder die Masse luftgetragener Partikel größer $10\ \mu\text{m}$ aerodynamischen Durchmessers gravimetrisch unter Variation der Geschwindigkeit zu messen.

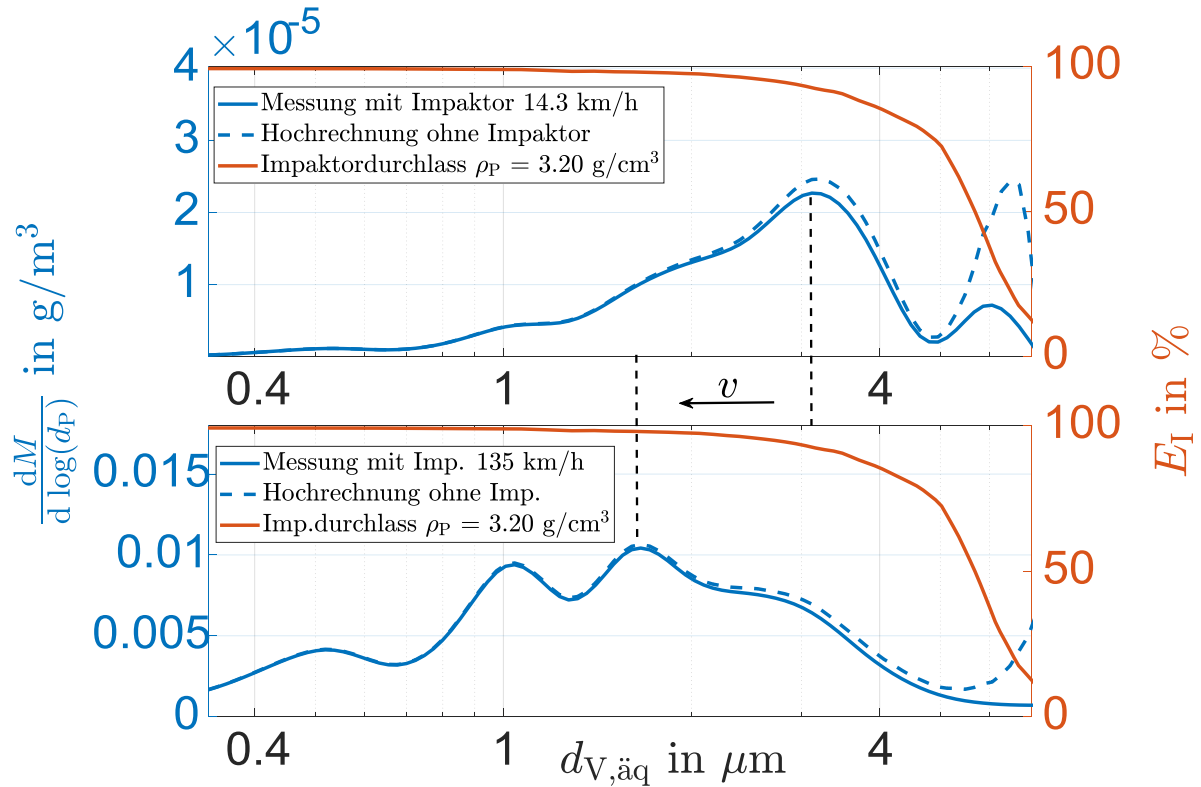


Abbildung 57: Visualisierung des hypothetischen Erklärungsansatzes für den überproportionalen Geschwindigkeitseffekt $m \sim v^3$. Massengrößenverteilung für Bremsungen bei niedriger (oben) und hoher (unten) Geschwindigkeit (linke y-Achse). Impaktordurchlasskurve¹²³ für Partikel, die die mittlere Belagdicke von $3,2\ \text{g/cm}^3$ aufweisen (rechts). Die Verschiebung der Größenverteilung hin zu kleineren Partikeldurchmessern bei hohen Geschwindigkeiten (Pfeil nach links) könnte zu dem überproportionalen Geschwindigkeitseffekt $m \sim v^3$ beitragen, indem bei kleinen Geschwindigkeiten ein größerer prozentualer Anteil der emittierten Verschleißmasse mit aerodynamischen Durchmessern größer $10\ \mu\text{m}$ emittiert würde, somit vom Impaktor abgeschieden würde und die PM_{10} -Emission bei niedrigen Geschwindigkeiten relativ zu der PM_{10} -Emission bei hohen Geschwindigkeiten verringert. Die Hochrechnung ohne Impaktor ergibt sich aus der gemessenen Massengrößenverteilung mit Impaktor multipliziert mit dem Kehrwert der Impaktordurchlasskurve. Insbesondere für kleine Impaktordurchlasswerte (nahe null) steigt die Unsicherheit der Hochrechnung aufgrund der unbekannten Abweichung der real verwendeten Impaktorkurve von der aus der Literatur entnommenen Impaktorkurve.

¹²³ DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Außenluft –Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM_{10} -oder $PM_{2,5}$ -Massenkonzentration; Deutsche Fassung EN 12341:2014 (2014).

6.4 Emission bei nicht betätigter Bremse

Aus dem Stand der Forschung sind Versuche mit Geschwindigkeitspyramiden zur Untersuchung der Off-Brake-Emission bekannt^{124 125}. Eine Erkenntnis dieser Untersuchungen ist, dass auf der absteigenden Seite von Geschwindigkeitspyramiden geringere Anzahlkonzentrationen auftreten als auf der ansteigenden Seite von Geschwindigkeitspyramiden. Ein Erklärungsansatz für dieses Phänomen besteht darin, dass die Drehbewegung der Bremscheibe Partikel aus Belagkavitäten herauslöst. Dieses Phänomen wird in der Literatur als Reservoir-Verhalten beschrieben¹²⁶. Eine verringerte Emission auf den absteigenden Seiten der Geschwindigkeitspyramiden wäre somit die Folge eines zu einem gewissen Grad entleerten Reservoirs, da trotz Drehbewegung der Scheibe keine weiteren Partikel aus den Kavitäten herausgelöst werden. Der Wirkmechanismus, der zwischen der Drehbewegung der Scheibe und dem Herauslösen der Partikel besteht, ist im Stand der Forschung noch nicht abschließend geklärt. Er wird jedoch in Kapitel 7.1 gemeinsam mit Ergebnissen zur Belagrückstellung diskutiert. Zudem ist die Frage ungeklärt, ob ein erneutes Beschleunigen auf bereits erreichte (oder noch höhere) Geschwindigkeitsstufen erneut zu einer Partikelemission im gleichen (oder noch höheren) Maße führt oder ob keine weitere Emission auftritt. Sofern beim erneuten Beschleunigen keine oder nur eine verringerte Emission auftreten würde, wäre dies ein Indiz (aber kein Nachweis) für das oben beschriebene Reservoirverhalten.

Zur Untersuchung dieser Fragestellung dient der in Abbildung 58 links oben dargestellte Versuchsplan, der aus fünf Geschwindigkeitspyramiden besteht, deren Stufenanzahl von der ersten bis zu dritten Pyramide ansteigt und anschließend von der dritten bis zur fünften Stufe abfällt. Dieses aus fünf Pyramiden bestehende Experiment wurde fünf Mal wiederholt, wobei zwischen jeder Wiederholung 30 Schleppbremsungen mit $p = 5\text{bar}$, $v = 50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, $T_{\text{Start}} = 80^\circ\text{C}$ durchgeführt wurden. Der Mittelwert der dabei in Echtzeit gemessenen PM_{10} -Emission pro Stufe ist in Abbildung 58 links unten in chronologischer Reihenfolge aufgetragen. Abbildung 58 rechts überführt die zeitliche Abfolge der beiden linken Diagramme in eine Darstellung Massenemission über Geschwindigkeit. Die Information über die chronologische Reihenfolge ist anhand von Pfeilen und Nummern der Geschwindigkeitsstufen enthalten. Zusätzlich zu den Mittelwerten ist die Standardabweichung pro Geschwindigkeitsstufe in Form von Unsicherheitsbalken dargestellt. Der Vergleich der aufsteigenden Seiten der Pyramidenversuche mit den absteigenden Seiten zeigt, dass die PM_{10} -Emission pro Stufe bei wiederholtem Beschleunigen geringer ausfällt als beim erstmaligen Beschleunigen (1, 2, 5, 10). Die Emissionsmaxima bei 100, 150 und 200 km/h sind verschieden groß, weisen jedoch keinen monotonen an- oder absteigenden Verlauf auf,

¹²⁴ Mathissen, M. et al.: Brake Emissions of a Passenger Car on a Chassis Dynamometer (2019).

¹²⁵ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019).

¹²⁶ Ostermeyer, G.-P.; Kijanski, J.: Surface Reservoir Dynamics in Friction Interfaces (2019).

sondern haben ein Minimum bei 150 km/h. Nach Überschreiten der maximalen Geschwindigkeit von 200 km/h (Stufe 10) treten in der zweiten Hälfte des Versuchs (Stufen 11-19) erheblich geringere PM_{10} -Emissionen auf, die jedoch größer null sind. Für das beschriebene Verhalten der Bremse bezüglich Off-Brake-Emissionen in wiederkehrenden Geschwindigkeitsstufen werden in Abschnitt 7.1 mehrere Erklärungsansätze gemeinsam mit den Ergebnissen zur Belagrückstellung diskutiert. Bereits an dieser Stelle lässt sich jedoch festhalten, dass die Beobachtungen im Einklang mit der Vorstellung eines Reservoirs stehen, das in Abhängigkeit der Rollgeschwindigkeit geleert wird.

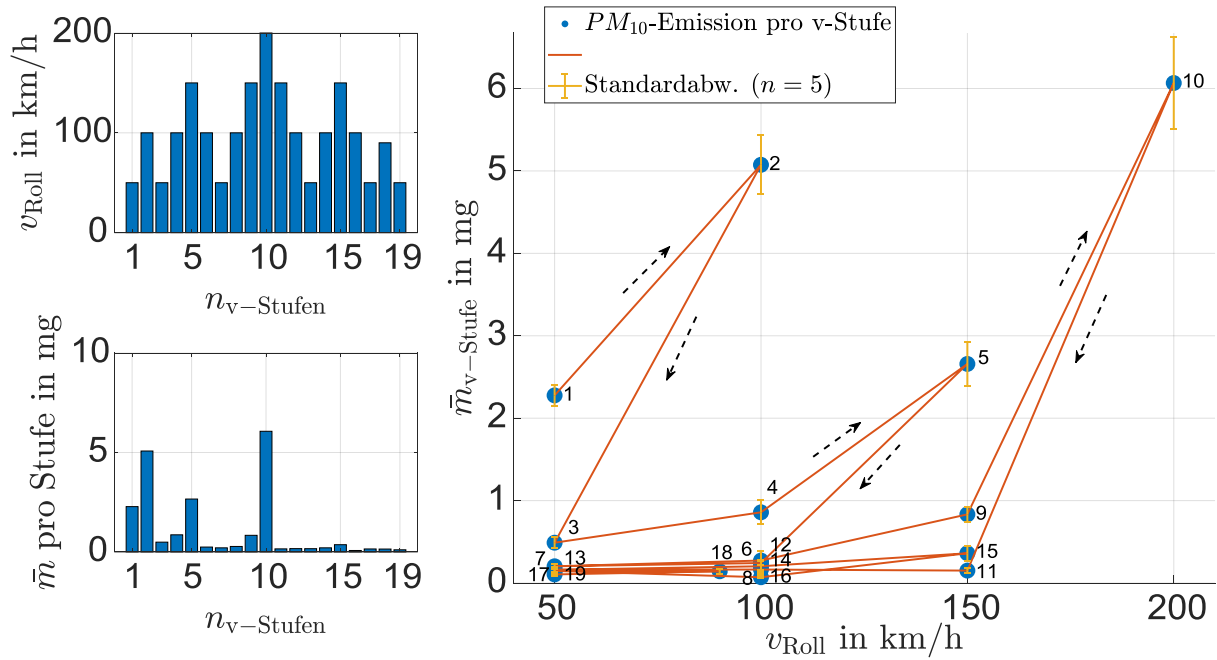


Abbildung 58: Pyramidenförmiger Versuchsplan zur Untersuchung der Geschwindigkeitsabhängigkeit und Reproduzierbarkeit von Off-Brake-Emissionen (oben links). Mittelwert ($n=5$) der summierten Emission pro Geschwindigkeitsstufe in chronologischer Reihenfolge (unten links). Mittelwert und Standardabweichung ($n=5$) der summierten Emission pro Geschwindigkeitsstufe über der Geschwindigkeit (rechts).

7 Konstruktive Einflussgrößen auf das Emissionsverhalten

7.1 Belagrückstellung

7.1.1 Ergebnisse Belagrückstellung

Der folgende Abschnitt umfasst zuvor veröffentlichte Ergebnisse¹²⁷ der Messungen, die gemäß der Untersuchungsmethodik aus Abschnitt 4.3.4 mit Belagrückstellfedern durchgeführt wurden. Schwerpunkt der Untersuchung ist der Vergleich mit und ohne Belagrückstellung sowie der Effekt der Luftspaltbreite auf das Emissionsverhalten.

Sowohl Bremse 1 (375 mm, ECE-Beläge, Schwimmsattel) als auch Bremse 2 (305 mm, ECE-Beläge, Schwimmsattel) wurden mit und ohne Belagrückstellung untersucht. Da der WLTP-Zyklus verzögerungs- bzw. zeitgesteuert implementiert ist, kompensiert der PID-Drehmoment-Regler die Rückstellkraft der Rückstellfedern durch Verwendung höherer Bremsdrücke. Die Zeitverläufe der Geschwindigkeit sind daher in beiden Tests nahezu identisch. Lediglich in der vorletzten Bremsung des WLTP trat ein signifikanter Unterschied mit und ohne Rückstellung auf, da der PID-Regler die Rückstellkraft in dieser Bremsung nicht in geeigneter Weise kompensieren konnte. Diese Abweichung ist in Abbildung 59 hervorgehoben. Bei diesem Bremsereignis führte die Prüfstandsregelung mit Belagrückzug geringere Verzögerungen aus als ohne. Dieser Unterschied muss der Vollständigkeit halber erwähnt werden, und sein Beitrag zum Gesamtemissionsfaktor wird anschließend diskutiert.

¹²⁷ Nach Niemann, H. et al.: Influence of pad retraction on PM10 wear emissions (2021).

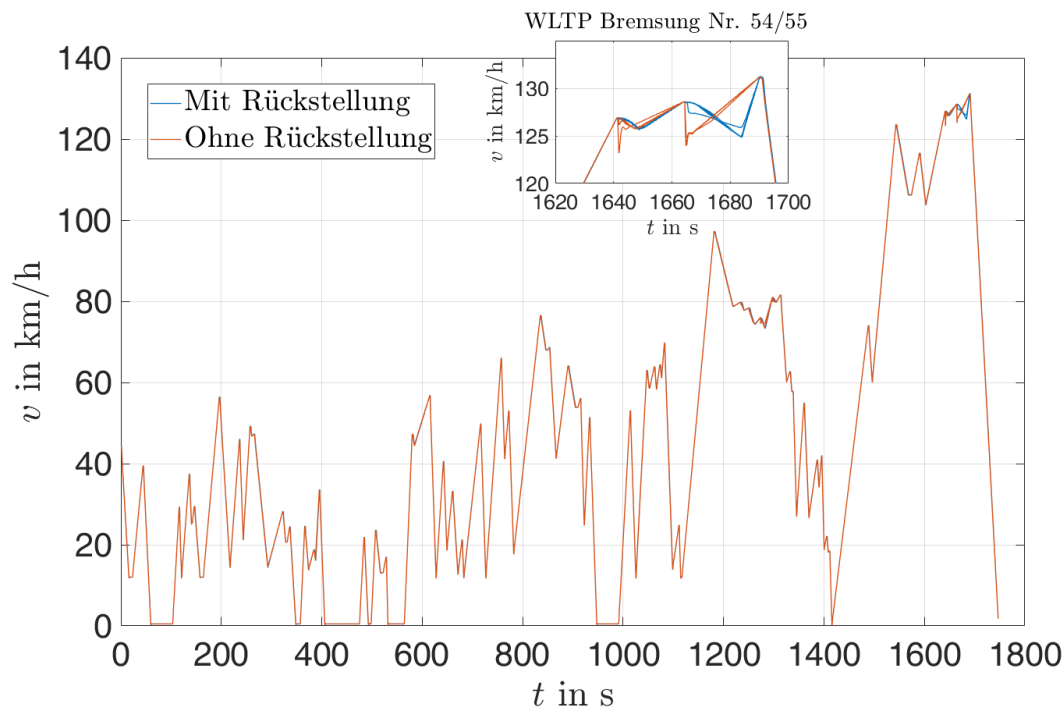


Abbildung 59: Geschwindigkeits-Zeitverlauf des Abgas-WLTP-Zyklus mit und ohne Belagrückstellung. Die Bremsung Nr. 54 ist durch eine vergrößerte Schnittdarstellung hervorgehoben.

Aufgrund der gleichen Verzögerungen und folglich der gleichen Reibarbeit, die von beiden Systemen absorbiert wurde, unterschied sich die mittlere Scheibentemperatur mit und ohne Belagrückstellung im Rahmen der erhobenen Stichprobe nicht signifikant ($1,1\text{ °C}$), was im Anhang in Abbildung 89 dargestellt ist. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse bezüglich Geschwindigkeit und Temperatur, dass beide Systeme mit Ausnahme der Bremsung Nr. 54 unter den gleichen Testbedingungen geprüft wurden.

Die Auswirkung der Belagrückstellung auf das Emissionsverhalten wird exemplarisch anhand von zwei Beschleunigungsphasen und anschließenden Bremsereignissen gezeigt, die in Abbildung 60 dargestellt sind und zur "Medium Speed Section" des WLTP gehören. Im oberen Teil der Abbildung sind die Geschwindigkeitsprofile für die Bremse 2 mit und ohne Belagrückstellung (Luftspaltbreite $0,25\text{ mm}$) dargestellt. Im unteren Teil der Abbildung ist die Massenemissionsrate über der Zeit aufgetragen. Für beide Konfigurationen (mit und ohne Belagrückstellung) sind zwei Emissionsratenpeaks in Folge der Bremsungen aufgetreten. Während der Off-Brake-Phasen (Beschleunigung von 0 auf 50 km/h und von 45 auf 55 km/h) treten Off-Brake-Emissionen ohne Belagrückstellung auf, jedoch nicht mit rückgestellten Bremsbelägen. Mit Belagrückstellung ist die Massenemission in der Off-Brake-Phase ähnlich dem Hintergrundniveau. Lediglich während Off-Brake-Phasen mit hohen Geschwindigkeiten treten reproduzierbar geringe Mengen an Off-Brake-Emission auf. Dieses Phänomen ist in Abbildung 65 und Abbildung 66 zu Beginn der Extra-High-Sektion des WLTP während der Beschleunigungsphase auf 130 km/h zu beobachten. Die Reduktion der Off-Brake-Emissionen trat während des gesamten Testzyklus mit zurückgestellten Belägen in reproduzierbarer Weise auf. Folglich führte die Belagrückstellung zu

deutlich niedrigeren Off-Brake-Emissionen. Die Auswirkung dieses veränderten Verhaltens auf den Gesamt-Emissionsfaktor des Testzyklus wird im folgenden Abschnitt weitergehend analysiert.

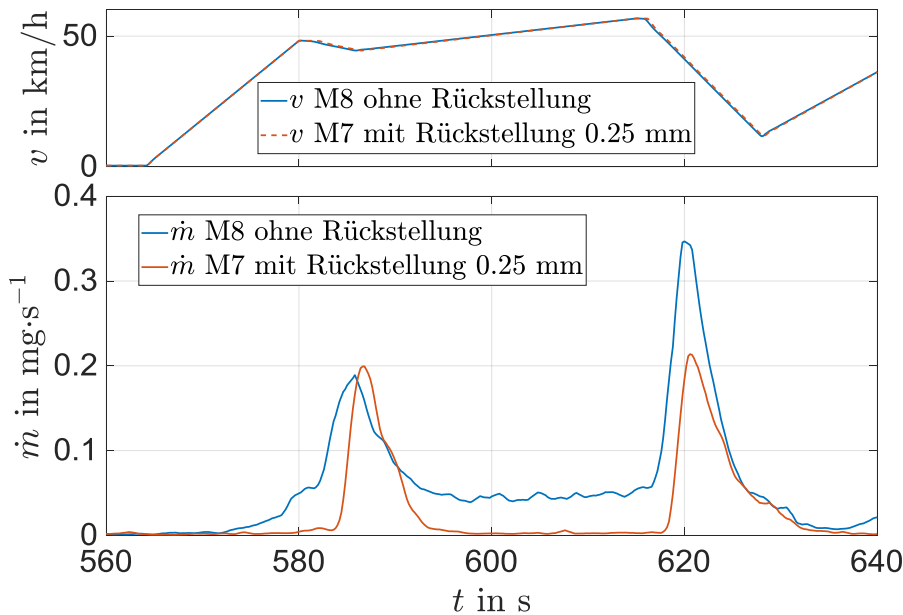


Abbildung 60: Zeitverläufe der Geschwindigkeit (oben) sowie der Massenemissionsrate für zwei Beschleunigungsphasen mit nachfolgenden Bremsereignissen mit und ohne Belagrückstellung. Das veränderte zeitliche Emissionsverhalten der Bremse 2 mit und ohne Belagrückstellung ist durch die annähernd vollständige Unterdrückung der Off-Brake-Emission zu erkennen.

Die Massenkonzentrationsverteilung für die Messungen mit und ohne Rückstellung ist in Abbildung 61 dargestellt. Aufgrund des kubischen Zusammenhangs zwischen Partikeldurchmesser und Partikelvolumen bzw. -masse liegt der Hauptanteil von PM_{10} im Messbereich des OPS (370 nm bis 10 μm), während der Beitrag des FMPS (5,6 nm bis 560 nm) zur Massenmessung vernachlässigbar ist. Im Übergangsbereich beider Geräte wurde eine Interpolation durchgeführt, da beide Geräte die Konzentration in diesem Bereich zu unterschätzen scheinen. Der Vergleich der Massenverteilung mit und ohne Rückstellung zeigt kleine quantitative Änderungen, aber keine qualitative Verschiebung des maximalen Peaks der Massenverteilung bei 2 μm .

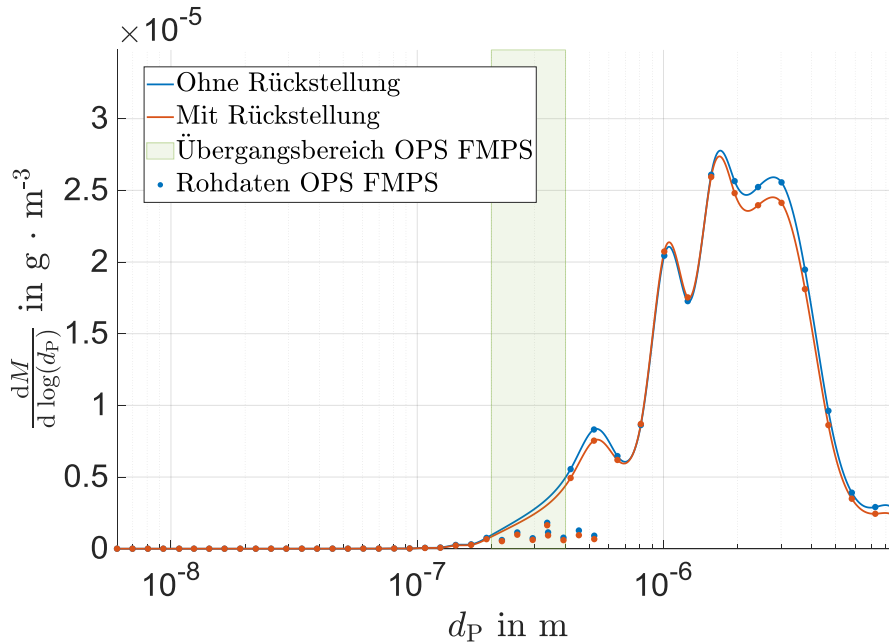


Abbildung 61: Massengrößenverteilung für beide Konfigurationen (mit und ohne Rückstellung), gemessen mit OPS und FMPS. Der Übergangsbereich beider Geräte (untere Messbereichsgrenze OPS und obere Messbereichsgrenze FMPS) ist grün markiert. Die Größenverteilung wurde in diesem Bereich durch Interpolation abgeschätzt.

Bremse 1 wurde fünfmal ohne Belagrückstellung und sechsmal mit Belagrückstellung bei einer Luftspaltbreite von 0,5 mm getestet (siehe Abbildung 62). Ohne Belagrückstellung wurde ein mittlerer Emissionsfaktor von $11,8 \pm 0,6$ mg/km im WLTP ermittelt. Mit Belagrückstellung wurde ein etwas niedrigerer Mittelwert ($11,3 \pm 1$ mg/km) ermittelt. Beide Mittelwerte liegen jedoch innerhalb der empirischen Standardabweichungen. Innerhalb der Stichprobe dieses Experiments wurde somit kein signifikanter Unterschied mit und ohne Belagrückstellung festgestellt, obwohl die Off-Brake-Emissionen durch die Rückstellung der Beläge nahezu vollständig vermieden wurden und obwohl eine qualitative Reduzierung des Off-Brake-Drehmomentsignals festgestellt wurde. Diese qualitative Drehmomentreduktion sollte jedoch in zukünftigen Untersuchungen mit einem geeigneten Messaufbau für Restmomentmessungen quantifiziert und validiert werden, um eine mögliche Korrelation zwischen Restschleifmoment und Off-Brake-Emission zu untersuchen.

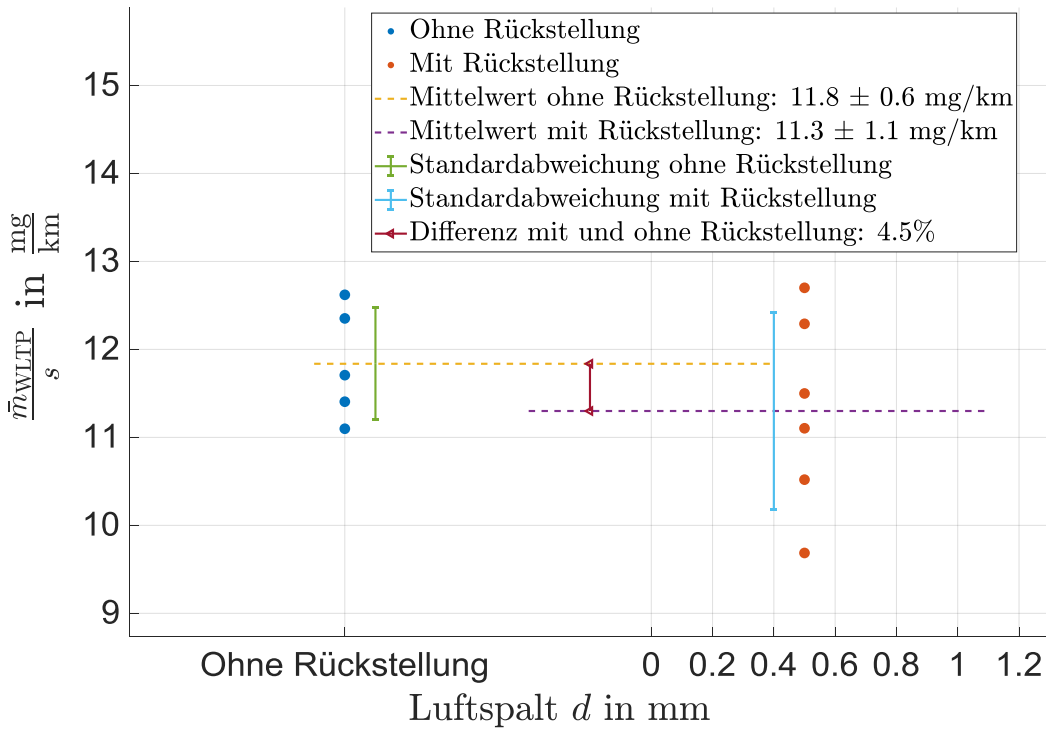


Abbildung 62: Mittlere Emissionsfaktoren für die 11 Messblöcke von Bremse 1 mit und ohne Belagrückstellung. Jeder Messblock enthält fünf WLTPs. Der Gesamtmittelwert der beiden Konfigurationen ist zusammen mit der jeweiligen empirischen Standardabweichung aufgetragen.

Für Bremse 2 (Abbildung 63) wurden geringere Standardabweichungen beobachtet und die Mittelwerte (ohne Belagrückstellung: $5,73 \pm 0,05$ mg/km im Vergleich zu $5,39 \pm 0,2$ mg/km mit Belagrückstellung) liegen leicht außerhalb der Vertrauensbereiche der Standardabweichung. Der Unterschied der errechneten PM_{10} -Emissionsfaktoren beträgt 6 %. Innerhalb der vorhandenen Stichprobe und den genannten Standardabweichungen konnte kein Effekt der Luftspaltbreite (zwischen 0,17 mm und 5 mm) auf den Emissionsfaktor nachgewiesen werden. Stattdessen wurde ein binäres Verhalten beobachtet, das nicht abhängig von der Luftspaltbreite ist.

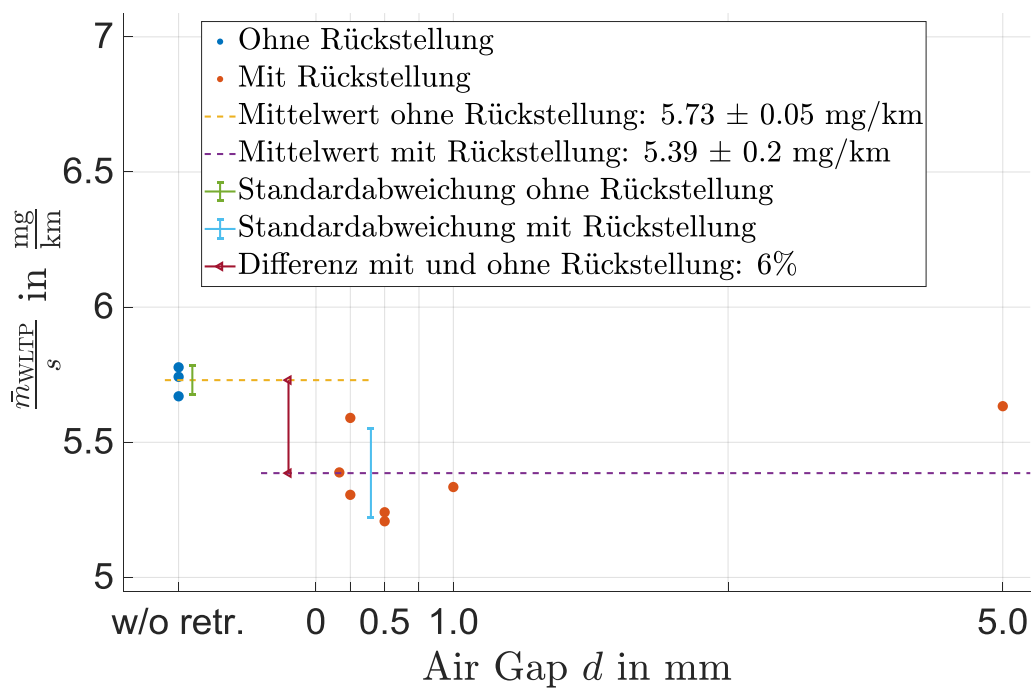


Abbildung 63: Mittlere Emissionsfaktoren für die Messungen mit Bremse 2 mit und ohne Belagrückstellung bei unterschiedlichen Luftspaltbreiten.

Der Anteil der Off-Brake-Emissionen mit und ohne Belagrückstellung ist in Abbildung 64 visualisiert. Für beide Bremsen ist eine Emissionsverschiebung von den Off-Brake-Phasen zu den On-Brake-Phasen mit Belagrückstellung zu beobachten. Die Off-Brake-Emissionen reduzieren sich von 16 % auf 3 % für Bremse 1 und von 30 % auf 3 % für Bremse 2, wobei die Gesamtemissionsfaktoren sich jedoch nicht signifikant unterscheiden. Obwohl der relative Beitrag zum Gesamtemissionsfaktor zwischen den beiden Bremsen um den Faktor 2 abweicht (16 % gegenüber 30 %), ist die absolute Off-Brake-Emission nahezu gleich groß.

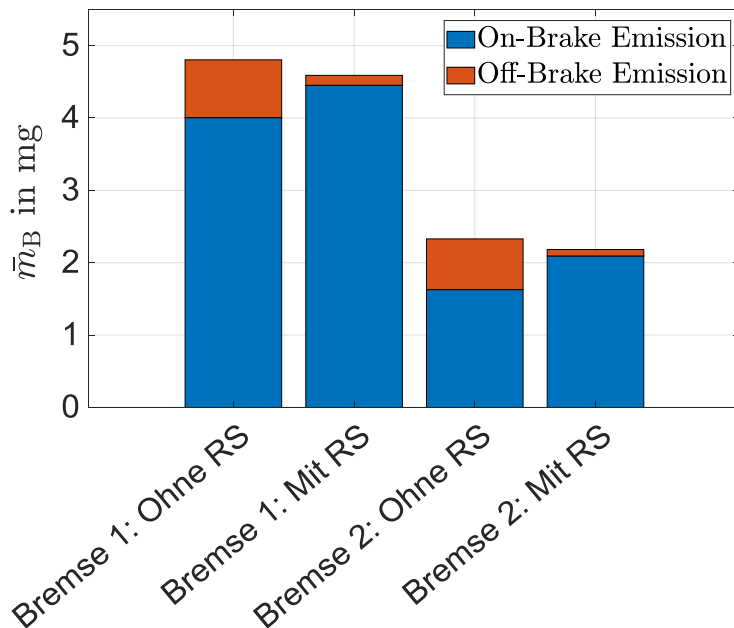


Abbildung 64: Mittlere PM_{10} -Emission pro Bremsung im WLTP und der Anteil der On-Brake (blau) sowie der Anteil der Off-Brake-Emission (orange) für Bremse 1 (links) und Bremse 2 (rechts) mit und ohne Belagrückstellung.

Um ein detaillierteres Verständnis dieses Phänomens zu erhalten, wurde die zeitlich aufgelöste Emission, die von OPS und FMPS gemessen wurde, in Abbildung 65 (Bremse 1) und Abbildung 66 (Bremse 2) über der zurückgelegten Strecke aufgetragen. Die oberen Teile der beiden Diagramme sind Geschwindigkeitsverläufe über dem Weg mit und ohne Belagrückstellung. Abgesehen von einer vernachlässigbaren Verschiebung des zurückgelegten Weges (der sich über den Zyklus auf eine maximale Differenz von 70 m aufsummiert), zeigt der Geschwindigkeits-Weg-Verlauf keine relevanten Unterschiede für den Vergleich der beiden Konfigurationen.

In den unteren Diagrammen sind auf der linken y-Achse die Massenemissionsraten (blaue und orange Linien) sowie auf den rechten y-Achsen (grüne Linie) die kumulierte Differenz mit und ohne Belagrückstellung aufgetragen. Zusätzlich sind die WLTP-Geschwindigkeitssektionen (Low bis Extra-High) eingezeichnet. Mit der Rückstellung der Bremsbeläge werden, wie bereits zuvor beschrieben, die Off-Brake-Emissionen unterdrückt. Die durchschnittliche Emissionsrate während der On-Brake-Phasen ist mit Rückstellung höher. Dieses Verhalten zeigt sich in der Differenz der kumulierten Emission, die während der

Beschleunigungsphasen vor Bremsereignissen ansteigt (mehr Emission ohne Belagrückstellung) und während der Bremsvorgänge (mehr Emission ohne Belagrückstellung) zunimmt.

Der Hauptunterschied zwischen den beiden Konfigurationen wird in den "Low- und Medium-Sektionen des WLTP generiert, während die High- und Extra-High-Sektion sogar Bremsereignisse enthalten, die mit Belagrückstellung zu höheren Emissionen als ohne Belagrückstellung führen. Dieser gegenläufige Effekt der Emissionsreduktion in der Low/Medium Speed Sektion und Emissionserhöhung in der High/Extra-High-Sektion wird im folgenden Abschnitt detailliert mit einem Fokus auf die Reservoir-Hypothese diskutiert, da das Reservoir-Verhalten eine mögliche Erklärung für diesen Effekt ist. Dennoch sind die absoluten kumulativen Differenzen, die auf der rechten y-Achse aufgetragen sind, (Bremsen 1: 4,5, Bremsen 2: 6 %) im Vergleich zu den Emissionsfaktoren des Zyklus klein. Die in Abbildung 59 aufgezeigten Geschwindigkeitsunterschiede des vorletzten Bremsvorgangs (18 – 19 km) müssen bei der Bewertung der kumulierten Differenz mit Belagrückstellung berücksichtigt werden, da der PID-Regler des Schwungmassenprüfstandes mit Rückstellfedern nicht die gleiche Reibungsenergie für beide Konfigurationen (mit und ohne Belagrückstellung) aufgebracht hat. Dieses Phänomen trat insbesondere bei Bremsen 1 auf. Vor diesem Hintergrund sind die ohnehin geringen Differenzen von 4,5 und 6 % zusätzlich zu hinterfragen. Es ist zu erwarten, dass eine korrekte Ausführung der Bremsung Nr. 54 die ohnehin schwer nachweisbaren Differenzen weiter verringern würde.

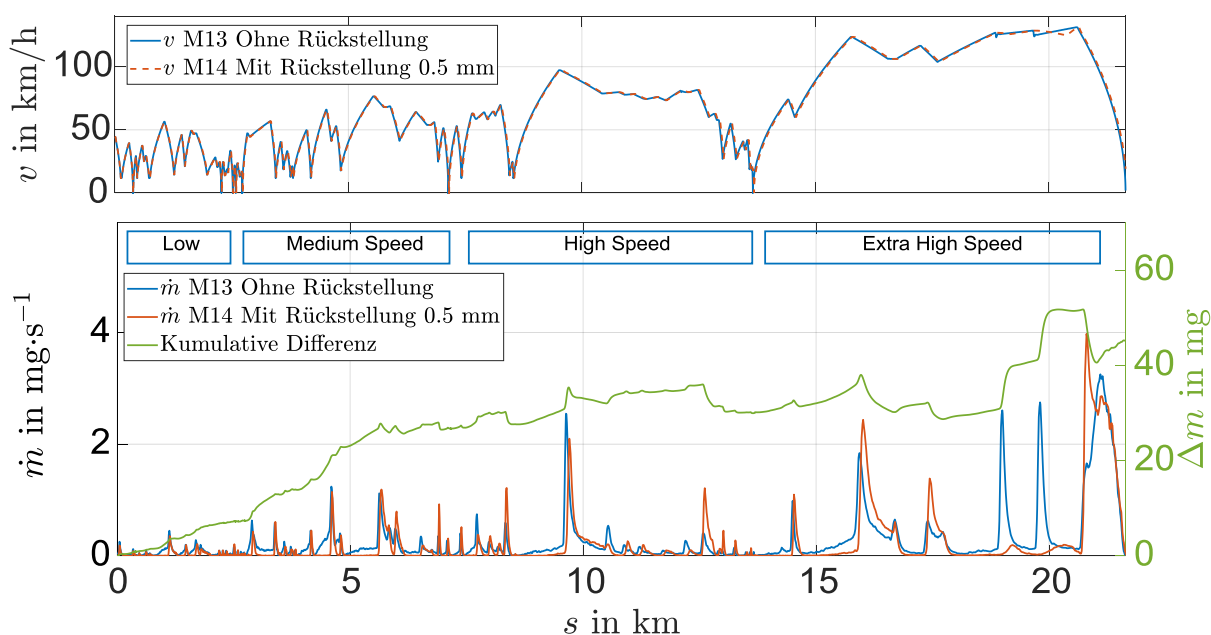


Abbildung 65: Bremsen 1: Massenemissionsrate aufgetragen über der Strecke und kumulierte Differenz (4,5 % des Emissionsfaktors ohne Rückstellung) mit und ohne Rückstellung

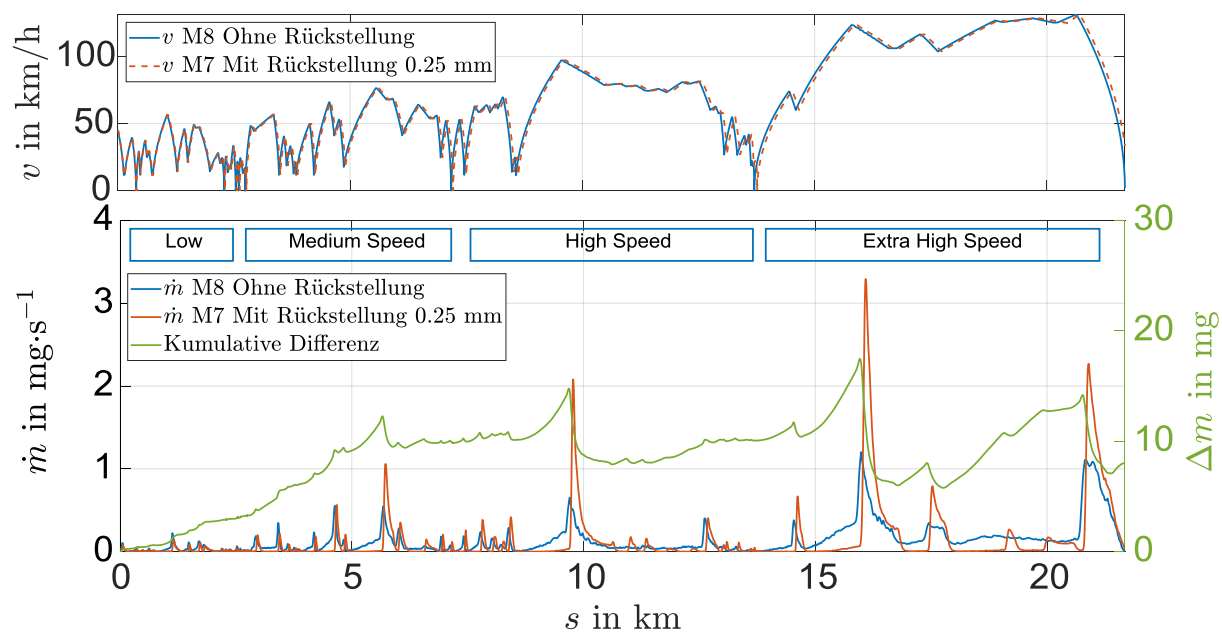


Abbildung 66: Bremse 2: Massenemissionsrate aufgetragen über der Strecke und kumulierte Differenz (4,5 % des Emissionsfaktors ohne Rückstellung) mit und ohne Rückstellung

7.1.2 Diskussion Belagrückstellung

Durch die Belagsrückstellung kommt es zu einer signifikanten Änderung des zeitaufgelösten Emissionsverhaltens, da der Anteil der Off-Brake-Emission sich bei Bremse 1 von 16 % auf 3 % und bei Bremse 2 von 30 % auf 3 % reduziert. Dennoch ändert sich der im WLTP gemessene Gesamtemissionsfaktor nicht wesentlich, da sich die Emissionen von den Off-Brake-Phasen in die On-Brake-Phasen verlagern. Die Belagrückstellung korreliert somit mit einer signifikanten Emissionsreduzierung während der Off-Brake-Phasen.

Trotz dieser Korrelation steht ein kausaler Nachweis für den Ursprung der Off-Brake-Emissionen noch aus. Daher werden in diesem Abschnitt mögliche Erklärungsmodelle in einer qualitativen Weise diskutiert. Die Modelle und ihre Vorhersagen sowie der aktuelle Wissensstand zu diesen Hypothesen sind in Tabelle 2 zusammengefasst und werden im Folgenden erläutert. Es werden drei Hauptprinzipien als möglicher Ursprung für die Off-Brake-Emissionen angenommen:

1. Restschleifmoment ...
 - a. Abscheren von Reservoirpartikeln aus den Belagkavitäten
 - b. Erzeugen und Emittieren neuer Verschleißpartikel
2. Luftstrom / Unterdruck im Luftspalt
3. Zentrifugalkräfte, die auf die an der Scheibenoberfläche anhaftenden Partikel wirken

Das Restschleifmoment könnte als primäre Quelle für Verschleißpartikel wirken ("kontinuierliche Bildung und Zerstörung von Drittkörperoberflächenschichten"¹²⁸), aber auch als sekundärer Mechanismus, der Partikel aus einem Reservoir in den Belagskavitäten abschert, wenn der Füllstand des Reservoirs in den Kavitäten die gleiche Höhe erreicht wie die maximale Oberflächenhöhe des Belags. Im Falle des primären Mechanismus (1.b) wird erwartet, dass der Emissionsfaktor um den Anteil der Off-Brake-Emission (ca. 30 %) reduziert wird, wenn die Beläge nach der Bremsung zurückgestellt werden. Diese Vorhersage wurde jedoch im Rahmen dieser Studie nicht beobachtet. Folglich scheint die kontinuierliche Partikelgenerierung durch das Restschleifmoment nicht die Hauptquelle für Off-Brake-Emissionen zu sein. Sie kann jedoch Ursprung für einen geringeren Anteil sein, der möglicherweise nicht nachgewiesen wurde, sofern er kleiner als die Standardabweichungen der Messung ist.

Die Ergebnisse dieser Studie deuten vielmehr auf ein Reservoirverhalten des Bremsbelags hin, da gleiche Emissionsfaktoren mit und ohne Rückstellung mit einer ausgeglichenen Massenbilanz erklärt werden könnten. Diese Massenbilanz ist in Abbildung 67 und Abbildung 68 visualisiert. Gemäß dieser Massenbilanz muss der Verschleißeintrag kumulativ gleich dem Emissionsausgang sein, kann aber zeitlich verzögert auftreten. Das Phänomen

¹²⁸ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019).

der Reservoirpartikel wurde bereits zuvor von Ostermeyer, Kijanski & Schramm^{129 130} auf Grund der Analyse der Oberflächentopographie mittels Mikroskopbildern und Lasertriangulation in Tribometerversuchen beschrieben. Würden Bremsabriebpartikel aus einem Reservoir des Belages abgeschert, müsste der Füllstand dieser Hohlräume genauso hoch wie die höchsten Erhebungen in der Belagsoberfläche sein, damit ein mechanischer Kontakt zwischen Scheibe und Reservoirpartikeln ermöglicht werden könnte.

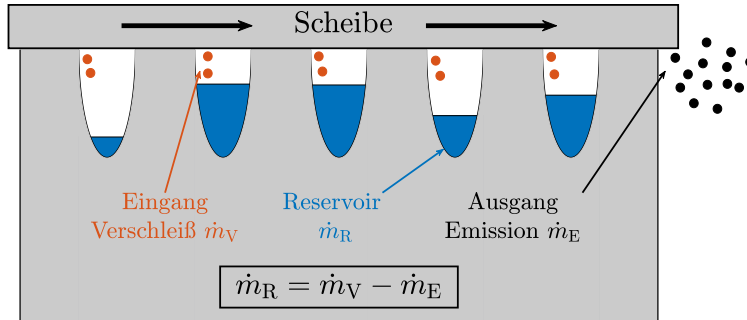


Abbildung 67: Massenbilanz für die On-Brake-Phase (bzw. für Restschleifkräfte) mit Verschleißmasse als Eingang (orange), Belagkavitäten als Reservoir für Verschleißpartikel (blau) und Feinstaubemissionen als Ausgang (schwarz). Schematische Darstellung in Anlehnung an das Reservoir-Modell von Ostermeyer & Kijanski¹³¹

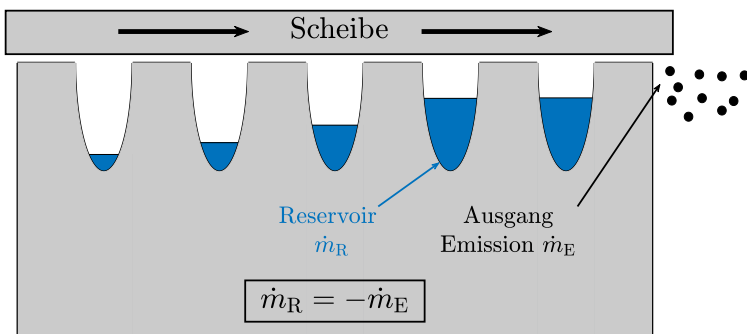


Abbildung 68: Massenbilanz für die Off-Brake-Phase mit Belagkavitäten als Reservoir für Verschleißpartikel (blau) und Feinstaubemissionen als Ausgang (schwarz). Schematische Darstellung in Anlehnung an das Reservoir-Modell von Ostermeyer & Kijanski¹³²

Obwohl ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Off-Brake-Emission von Farwick zum Hagen¹³³ und aus eigenen Untersuchungen bekannt ist¹³⁴, ist noch nicht verstanden, wie sich die Drehgeschwindigkeit, z. B. exponentiell, quadratisch oder kubisch, auf die Off-Brake-Emission auswirken könnte. Ein dynamisch erhöhter

¹²⁹ Schramm, T.; Ostermeyer, G. P.: Automated Brake Pad Surface Topography Measurement (2016).

¹³⁰ Ostermeyer, G.-P.; Kijanski, J.: Surface Reservoir Dynamics in Friction Interfaces (2019).

¹³¹ Ostermeyer, G.-P.; Kijanski, J.: Surface Reservoir Dynamics in Friction Interfaces (2019).

¹³² Ostermeyer, G.-P.; Kijanski, J.: Surface Reservoir Dynamics in Friction Interfaces (2019).

¹³³ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019).

¹³⁴ Niemann, H. et al.: System Identification Method for Brake Particle Emission Measurements (2018).

Druck durch eine Luftströmung zwischen Scheibe und Belag könnte ein Erklärungsansatz für dieses Verhalten sein, da der Staudruck quadratisch ansteigt und auch beim Einfahren des Belags noch ein geringer Anteil an Off-Brake-Emission auftritt. Eine analytische Beschreibung der Strömungsverhältnisse und der auf die Reservoirpartikel wirkenden aerodynamischen Kräfte wäre notwendig, um zu entscheiden, ob das Restschleifmoment (1.a) oder eine Luftströmung zwischen Scheibe und Belag (2.) die Hauptursache für die Off-Brake-Emissionen ist. Die Ergebnisse dieser Studie falsifizieren jedoch die Hypothese einer Luftströmung / eines Staudrucks als Hauptursache für Off-Brake-Emissionen, wenn der Luftspalt größer als 0,17 mm ist. Darüber hinaus kann zudem nicht ausgeschlossen werden, dass eine Luftspaltbreite kleiner als 0,17 mm aufgrund einer höheren Luftströmungsgeschwindigkeit im Luftspalt und eines größeren Unterdrucks Off-Brake-Emissionen hervorrufen könnte.

Fliehkäfte (3.), die auf Partikel an der Scheibenoberfläche wirken, können als Hauptquelle für die Off-Brake-Emission ausgeschlossen werden. Dies lässt sich daraus schließen, dass die Entfernung des Bremssattels, wie sie von Farwick zum Hagen et al.¹³⁵ durchgeführt wurde, die Off-Brake-Emissionen deutlich um eine Größenordnung reduzierte. Es ist aber weiterhin nicht ausgeschlossen, dass die verbleibenden Off-Brake-Emissionen, die von Farwick zum Hagen und auch in dieser Studie bei hohen Ausrollgeschwindigkeiten beobachtet wurden, durch Zentrifugalkräfte verursacht werden.

Tabelle 2: Überblick über mögliche Modelle für die Entstehung von Off-Brake-Emissionen, deren grundsätzliche Wirkkette, Modellvorhersagen sowie der aktuellen Kenntnisstand bezüglich deren Gültigkeit.

Modell	Wirkkette	Modellvorhersagen und aktueller Stand der Forschung
1. Restschleifmoment	a.) Mit Reservoir → Verbleibende Normalkraft → Reibkraft zwischen Belag und Scheibe → Emission von Reservoirpartikeln durch Scherkräfte	<ul style="list-style-type: none"> • Voraussetzung: Existenz eines Reservoirs und mechanischer Kontakt der Scheibe mit Reservoirpartikeln • Vorhersagen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Der Emissionsfaktor ändert sich nicht signifikant durch die Belagrückstellung (Massenbilanz Eingang Verschleiß = Ausgang Emission) • Beobachtung: Der Emissionsfaktor mit und ohne Belagrückstellung ändert sich nicht signifikant • Fazit: Indiz, dass Reservoirpartikel Quelle für Off-Brake-Emission sein können
	b.) Ohne Reservoir → Verbleibende Normalkraft → Reibkraft zwischen Belag und Scheibe → Generierung von Verschleißpartikeln → Sofortige Emission generierter Verschleißpartikel	<ul style="list-style-type: none"> • Voraussetzung: Mechanischer Kontakt der Scheibe mit Reservoirpartikeln • Vorhersagen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Das Restschleifmoment erzeugt kontinuierlich Verschleißpartikel, solange Scheibe und Belag in Kontakt bleiben ○ Die Gesamtemissionsfaktoren mit Rückstellung sollten um den Anteil der Off-Brake-Emissionen (ca. 30 %) reduziert werden. Stimmt nicht mit den Beobachtungen in dieser Studie überein. • Fazit: Die Generierung von Verschleißpartikeln durch Restschleifmo-

¹³⁵ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019).

		mente kann nicht die Hauptquelle für Off-Brake-Emissionen sein, könnte aber dennoch in geringerem Maße zur Off-Brake-Emission beitragen
2. Luftstrom zwischen Belag und Scheibe	<ul style="list-style-type: none"> → Relativgeschwindigkeit zwischen Scheibe und Belag → Reibkräfte zwischen Scheibe und Luft → Luftstrom zwischen Belag und Scheibe → Verringerung des statischen Drucks nach Bernoulli → Emission von Reservoirpartikeln auf Grund von Scherkräften zwischen Luftstrom und Partikeln 	<ul style="list-style-type: none"> • Voraussetzung: Existenz eines Reservoirs • Vorhersagen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Off-Brake-Emission ist begrenzt auf die maximale Partikelmasse im Reservoir ○ Abhängigkeit zwischen Off-Brake-Emission und Geschwindigkeit ist qualitativ zu erwarten, aber analytisch nicht beschrieben • Beobachtung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Geschwindigkeitsabhängigkeit der Off-Brake-Emission ist aus dem Stand der Forschung bekannt^{136 137 138} und wurde ebenfalls in dieser Studie beobachtet (geringe Off-Brake-Emission bei hohen Rollgeschwindigkeiten trotz Belagrückstellung) • Fazit: <ul style="list-style-type: none"> ○ Für Luftspalte > 0,17 mm als Hauptquelle der Off-Brake-Emission falsifiziert ○ Für Luftspalte < 0,17 mm noch als Hauptquelle für Off-Brake-Emission denkbar ○ Möglich als Nebenquelle für Off-Brake-Emission bei hohen Geschwindigkeiten auch trotz Belagrückstellung
3. Zentrifugalkraft	<ul style="list-style-type: none"> → Partikel haften durch Van-der-Waals-Kräfte an der Scheibe → Drehbewegung der Scheibe → Zentrifugalkräfte wirken auf anhaftende Partikel → Emission, wenn Zentrifugalkraft größer als Haftkraft 	<ul style="list-style-type: none"> • Beobachtung: Versuche ohne Bremssattel¹³⁹ ergaben eine signifikante Emissionsreduktion, die nicht mit dem Modell der Zentrifugalkräfte vereinbar ist • Fazit: Zentrifugalkräfte auf anhaftende Partikel können nicht die Hauptquelle für Off-Brake-Emission sein, könnten aber in geringerem Maße zur Off-Brake-Emission beitragen

7.1.3 Zwischenfazit Belagrückstellung

Ziel dieser Untersuchung ist, den Effekt der Belagrückstellung auf die Off-Brake-Emission und die WLTP-Emissionsfaktoren für zwei Pkw-Scheibenbremsen auf einem Schwungmassenprüfstand zu bestimmen. Unter Bezugnahme auf die in Abschnitt 3.1.3 vorgestellten Forschungsfragen erweitert diese Untersuchung den aktuellen Forschungsstand wie folgt:

PM₁₀-Reduktion während Off-Brake-Phasen:

Als dominante Einflussgröße zur Veränderung des zeitaufgelösten Emissionsverhaltens wurde die Rückstellung des Belages identifiziert. Der Anteil der Off-Brake-Emissionen am Gesamtemissionsfaktor reduziert sich mit Belagrückstellung im WLTP von 30 % bzw. von 16 % auf 3 %.

¹³⁶ Mathissen, M. et al.: Brake Wear Particle Emissions on a Chassis Dynamometer (2019).

¹³⁷ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019).

¹³⁸ Niemann, H. et al.: System Identification Method for Brake Particle Emission Measurements (2018).

¹³⁹ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019).

Gesamtes PM_{10} -Reduktionspotential durch Vermeiden von Restschleifmomenten:

Dennoch unterscheiden sich die Gesamtemissionsfaktoren mit und ohne Belagsrückstellung nicht signifikant, da die On-Brake-Emissionen ansteigen und somit die Reduktion während der Off-Brake-Phasen kompensieren.

Physikalische Ursache für Off-Brake-Emissionen:

Vier Mechanismen wurden als mögliche Ursachen für Off-Brake-Emissionen diskutiert:

1. Das Restschleifmoment in Kombination mit einem Reservoirverhalten scheint eine mögliche Erklärung für Off-Brake-Emissionen zu sein, aber nur, wenn der Füllstand des Speichers die höchsten Spitzen in der Oberflächentopographie des Belags erreicht, da dies die Voraussetzung für mechanischen Kontakt und Scherkräfte zwischen Scheibe und Speicherpartikeln ist.
2. Das Restmoment als Ursache für die kontinuierliche Erzeugung und Emission von Verschleißpartikeln wurde dadurch falsifiziert, dass die Emissionsfaktoren mit und ohne Belagrückstellung nahezu gleich hoch sind und der Anteil der Off-Brake-Emission (30 % bzw. 16 % des WLTP-Emissionsfaktors) in die On-Brake-Phasen verlagert wird.
3. Eine Luftströmung im Luftspalt zwischen Belag und Scheibe, die zu einem verminderten statischen Druck und damit zu einem Ansaugen von Verschleißpartikeln aus dem Belagsspeicher führt, bleibt als möglicher Erklärungsansatz erhalten, allerdings nur, wenn die Luftspaltbreite unter realen Fahrbedingungen ohne Belagrückstellung kleiner als 0,17 mm ist. Bei Belagrückstellung (Luftspaltbreite $\geq 0,17$ mm) traten Off-Brake-Emissionen nur zu einem sehr geringen Anteil von 3 % am Gesamtemissionsfaktor auf, wurden aber insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten beobachtet. Weitergehende Versuche mit messtechnischer Erfassung der Luftdruckverhältnisse zwischen Belag und Scheibe zur Korrelation von Unterdruck und Off-Brake-Emission sind Gegenstand zukünftiger Untersuchungen.
4. Durch die Versuche von Farwick zum Hagen et al.¹⁴⁰ mit und ohne Bremssattel wurde die Fliehkraft als Hauptursache für Off-Brake-Emissionen falsifiziert.

7.2 Exemplarische Variation der Reibpaarungen

7.2.1 Ergebnisse Reibpaarungen

Das Ziel der nachfolgend beschriebenen Untersuchung besteht darin, die Frage zu beantworten, welcher Anteil des Massenverschleißes als PM_{10} emittiert wird. Dieses Untersu-

¹⁴⁰ Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019).

chungsziel ist unter anderem darin motiviert, dass die Frage ungeklärt ist, ob verschleißmindernde Maßnahmen ebenfalls emissionsmindernd wirken. Damit einhergehend wird die Fragestellung untersucht, inwiefern PM_{10} -Emissionsfaktoren sensitiv bezüglich der im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten, exemplarischen Variation von Reibpaarungen sind. Die Auswahl der Reibmaterialien erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit zum Beispiel im Sinne einer vollfaktoriellen Variation der Reibmaterialien bzw. Scheibengeometrien. Stattdessen wurden die sieben vermessenen Reibpaarungen hinsichtlich ihres erwarteten Verschleißverhaltens ausgewählt, um eine signifikant messbare Varianz des Massenverschleißes zu erzielen. In einer weiterführenden Auswertung wird die Fragestellung diskutiert, welcher Anteil der Verschleißmasse als PM_{10} emittiert und welche Bestandteile der (luftgetragenen) Verschleißmasse nicht in PM_{10} enthalten sind.

Hierzu wurden drei verschiedene Scheibenmaterialien in zwei Scheibendurchmessern gepaart mit zwei Reibmaterialklassen vermessen. In Abbildung 69 sind die gravimetrisch bestimmten Emissionsfaktoren der sieben Reibpaarungen in zwei Wiederholungsmessungen dargestellt. Der maximale (375 mm Grauguss ECE) und minimale Emissionsfaktor (375 mm CCD NAO) unterschieden sich ca. um Faktor 6. Hinsichtlich der ordinalen Bewertung der Reibpaarungen im Sinne einer Rangfolge von Emissionsfaktoren (höher oder niedriger) ergaben die Wiederholungsmessungen mit Ausnahme eines Falls (400 mm GG ECE im Vergleich zu 400 mm WC ECE) reproduzierbare Ergebnisse.

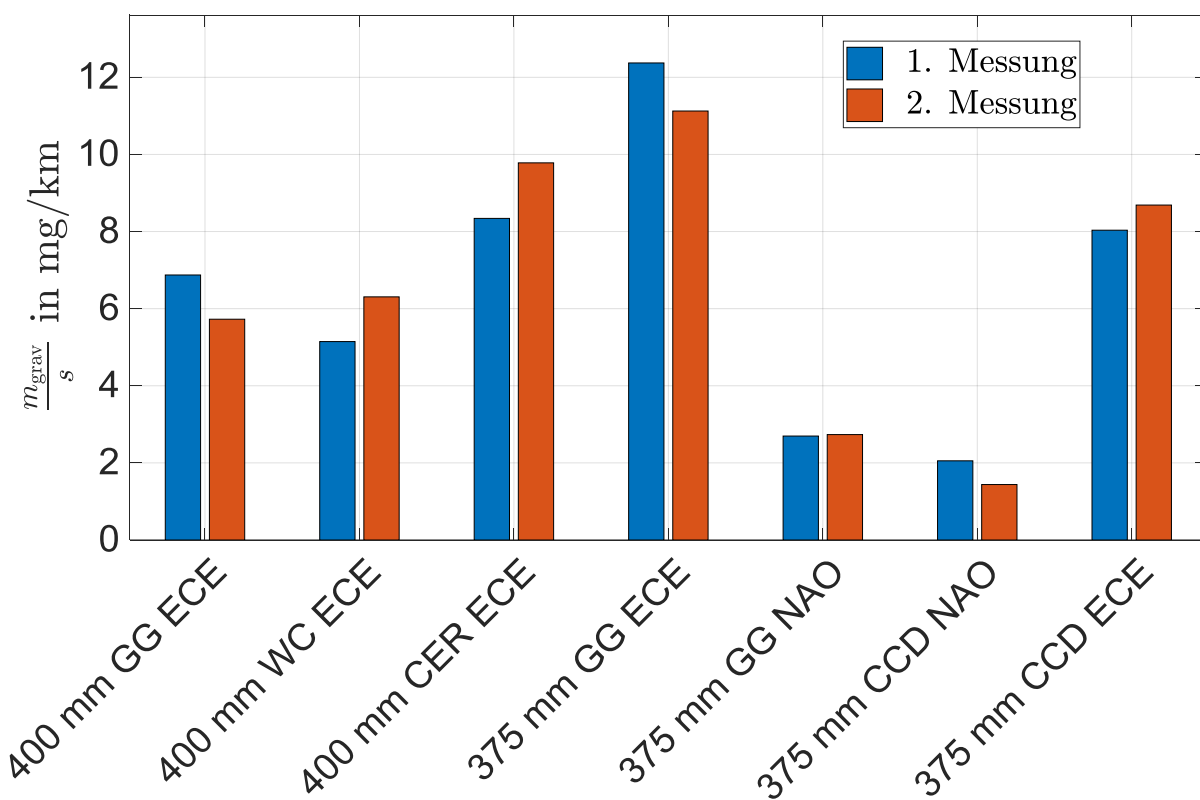


Abbildung 69: Gravimetrisch ermittelte PM_{10} -Emissionfaktoren für sieben exemplarische Reibpaarungen im WLTP-Zyklus (Abgas) mit drei Scheibenmaterialien GG = Grauguss, CCD = Ceramic Coated Disc, WC = Wolfram Carbid und zwei Reibmaterialklassen (ECE und NAO)

Die gravimetrisch ermittelten Emissionsfaktoren sind in Abbildung 70 über dem Scheibenmassenverschleiß (links oben), dem Belagmassenverschleiß (rechts oben) sowie dem Gesamtmassenverschleiß (unten) aufgetragen, der sich aus der Summe von Scheiben- und Belagverschleiß zusammensetzt. Als Verschleiß ist die Differenz der Scheibenmasse bzw. Belagmasse vor und nach den WLTP-Messzyklen definiert. Neben den Messwerten sind in Abbildung 70 proportionale Regressionen sowie deren Bestimmtheitsmaße dargestellt. Zwar ist ein augenscheinlicher Trend zu erkennen, dass hohe Emissionsfaktoren mit hohem Belag- bzw. Gesamtverschleiß einhergehen, jedoch ist kein monotoner Zusammenhang noch ein ausreichend hohes Bestimmtheitsmaß vorhanden, um einen proportionalen Zusammenhang zu begründen. Der Anteil von PM_{10} am Gesamtverschleiß liegt in der Größenordnung von 20 bis 50 % (Verhältnis 1:5 bis 1:2).

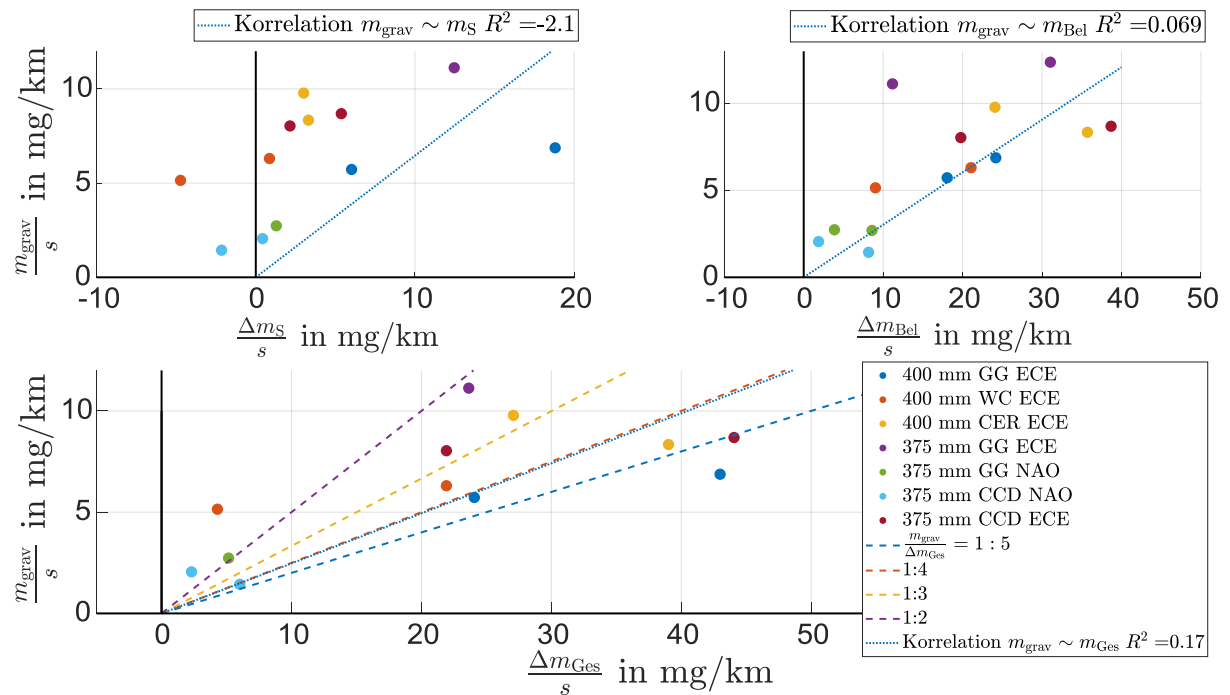


Abbildung 70: Gravimetrische Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von Scheiben- (links oben), Belag- (rechts oben) und Gesamtverschleiß (unten)

7.2.2 Diskussion Reibpaarungen

Zur weiterführenden Diskussion des variablen Anteils von PM_{10} am Gesamtverschleiß (20 bis 50 %) wird nachfolgend die durchschnittliche Partikeldichte sowie die per PM_{10} -Definition festgelegte Abscheidung luftgetragener Partikel betrachtet. Die durchschnittliche Partikeldichte berechnet sich nachfolgend aus dem Quotienten der gravimetrischen Masse zum Partikelvolumen, das mittels Streulichtmessung des OPS ermittelt wurde. In Abbildung 71 ist diese Berechnung durch Geraden unterschiedlicher Steigung veranschaulicht, die Streulichtdichtewerte zwischen 1 und 5 g/cm³ repräsentieren. Zur Einordnung der Dichteberechnung wird darauf hingewiesen, dass die Messung des Streulichtdurchmessers vom Brechungsindex abhängig ist und somit materialspezifischen Abweichungen unterlie-

gen kann. Die für die sieben Reibpaarungen berechneten Streulichtdichtewerte ρ^* sind in Abbildung 72 aufgetragen und zeigen eine Varianz um Faktor drei zwischen der geringsten (375 mm CCD NAO) und der höchsten Dichte (375 mm GG ECE). Der auffällig niedrige Dichtewert im Fall der Reibpaarung CCD NAO geht dabei mit einem niedrigen Emissionsfaktor sowie ebenfalls mit einem sehr niedrigen Scheibenverschleiß bzw. in einer Messung sogar einer Massenzunahme /-übertrag der Scheibe einher (Abbildung 70). Er ist jedoch dahingehend zu hinterfragen, dass die Materialien, die den Großteil an Masse in Belag und Scheibe darstellen, Dichten mit höheren Werten aufweisen. Die Dichten der Belagmaterialien und der Scheibe sind zum Vergleich in der Legende von Abbildung 74 aufgeführt. Eine mögliche Korrelation zwischen Emissionsfaktor und berechneter Streulichtdichte ist in Abbildung 73 anhand einer linearen Regression überprüft und weist ein Bestimmtheitsmaß von 0,56 auf.

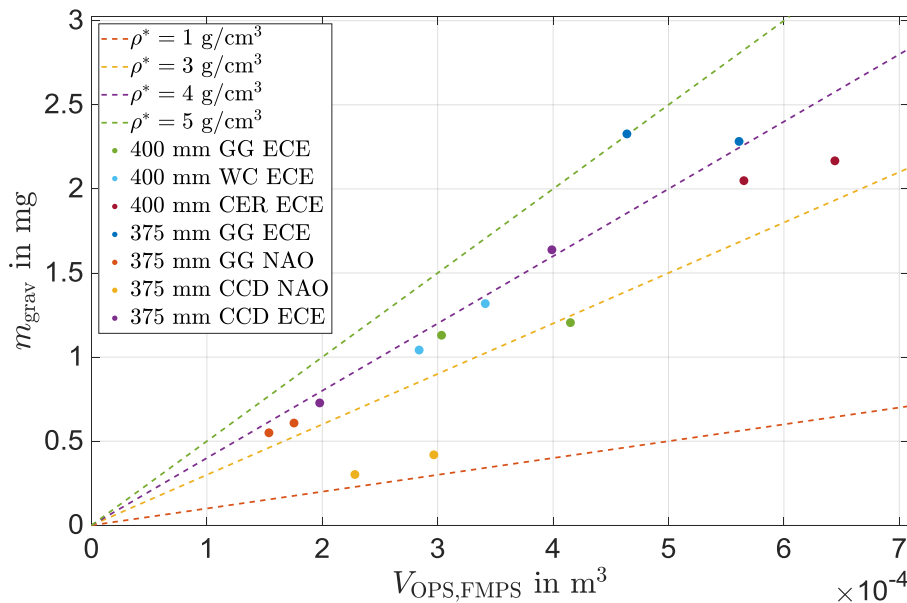


Abbildung 71: Gravimetrisch gemessene PM_{10} -Masse über dem mittels OPS berechneten Partikelvolumen zur Bestimmung der mittleren PM_{10} -Partikeldichte

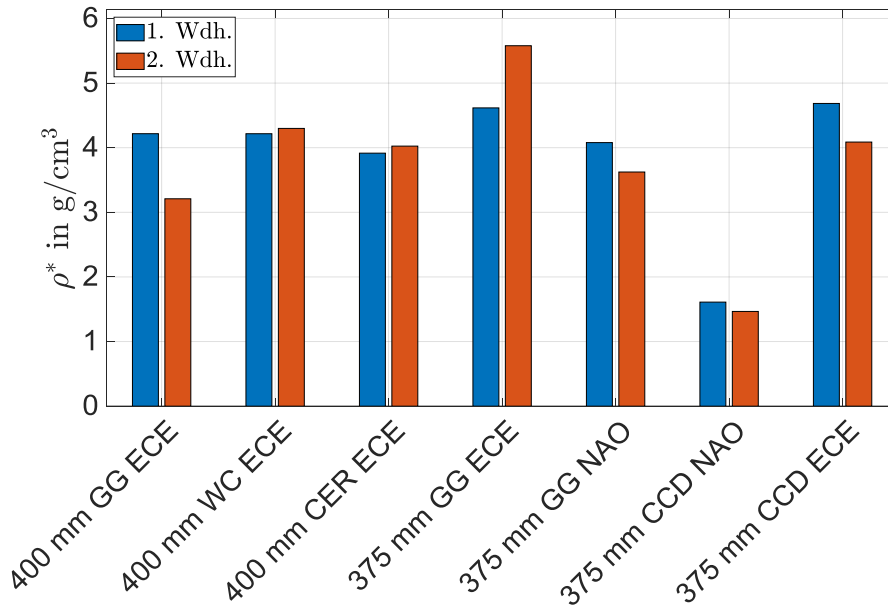


Abbildung 72: Aus gravimetrischer Messung und Streulichtmessung berechnete mittlere PM_{10} -Streulichtdichte ρ^*

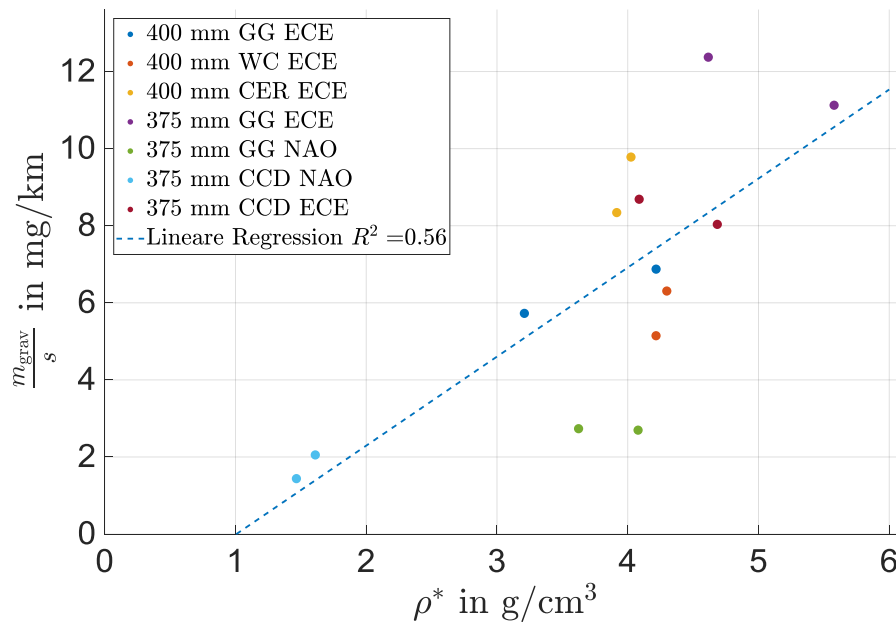


Abbildung 73: Gravimetrische Emissionsfaktoren in Abhängigkeit der berechneten PM_{10} -Streulichtdichte

Wie zu Beginn des vorliegenden Abschnitts erwähnt, soll die Frage diskutiert werden, welcher Anteil der luftgetragenen Verschleißpartikel per Definition zu PM_{10} zählt und welchen Effekt die Dichte von Partikeln auf diesen Anteil hat. Gemäß DIN 12341 umfasst PM_{10} per Definition den „Schwebstaub in der Luft, der einen gröbenselektiven Lufteinlass passiert, der bei einem aerodynamischen Durchmesser von $10\ \mu\text{m}$ eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist“. Dieses Abscheideverhalten ist in Abbildung 74 in Form des Impaktorwirkungsgrads für die Partikeldichte $1\ \text{g/cm}^3$ über dem volumenäquivalentem Durchmesser aufgetragen. Im Sonderfall der Partikeldichte $1\ \text{g/cm}^3$ entspricht der

volumenäquivalente dem aerodynamischen Durchmesser. Für Partikel, deren Dichte nicht der theoretischen Einheitsdichte von 1 g/cm³ entspricht, ist eine Umrechnung des aerodynamischen Durchmessers in den volumenäquivalenten Durchmesser notwendig:

$$d_{ae} = d_{Vol, \ddot{a}q} \sqrt{\frac{\rho_P}{\rho_1}} \quad 7.1$$

Hieraus resultiert eine Verschiebung der Impaktorwirkungsgradkurven hin zu kleineren volumenäquivalenten Durchmessern, je größer die Partikeldichte ist. Für zwei Drittel des Massenanteils¹⁴¹ eines Low-Met-Belages sind die Materialdichten in der Legende von Abbildung 74 aufgeführt. Vergleicht man die gemessene Anzahlgrößenverteilung einer exemplarischen Grauguss-ECE-Reibpaarung mit den Impaktorwirkungsgradkurven, so fällt auf, dass der Hauptanteil der Anzahlgrößenverteilung bei einem Durchmesser liegt, der um eine Größenordnung kleiner als die Impaktorabscheidekurven ist. Zieht man hingegen die Massengrößenverteilung zu diesem Vergleich heran (Abbildung 75), liegt der rechte Rand der gemessenen Massengrößenverteilung nah an den materialspezifischen Abscheidekurven. Dies deutet daraufhin, dass ein wesentlicher Teil der luftgetragenen Partikelmasse zwar die durchströmte Einhausung der Bremse verlässt, anschließend jedoch durch den nachgeschalteten PM_{10} -Impaktor abgeschieden wird und somit auch den Anteil an gemessener, luftgetragener Partikelmasse von der gesamten Verschleißmasse reduziert. Für ein weitergehendes Verständnis, welche Verschleißpartikel in Form von PM_{10} emittiert werden, wäre zudem die Information von Interesse, welche durchschnittliche Dichte einzelne luftgetragene Partikelgrößenklassen aufweisen. Dies könnte ein Ansatz sein, um Erkenntnis darüber zu erlangen, weshalb verschiedene Reibpaarungen potentiell unterschiedliche PM_{10} -Emissionsfaktoren aufweisen. Diese Erkenntnis könnte somit gegebenenfalls einen Beitrag zu der Optimierung von Reibmaterialien im Sinne einer Emissionsreduktion leisten. Wie bereits in Kapitel 6.3.4 erwähnt, sind zudem Untersuchungen mit und ohne Impaktor bzw. mit gravimetrischer Messung der Partikelmasse größer 10 µm aerodynamischen Durchmessers Gegenstand zukünftiger Studien, um oben genannten Erklärungsansatz der Abscheidung zu überprüfen.

¹⁴¹ Breuer, B.; Bill, K. H.: Bremsenhandbuch (2017), S. 581.

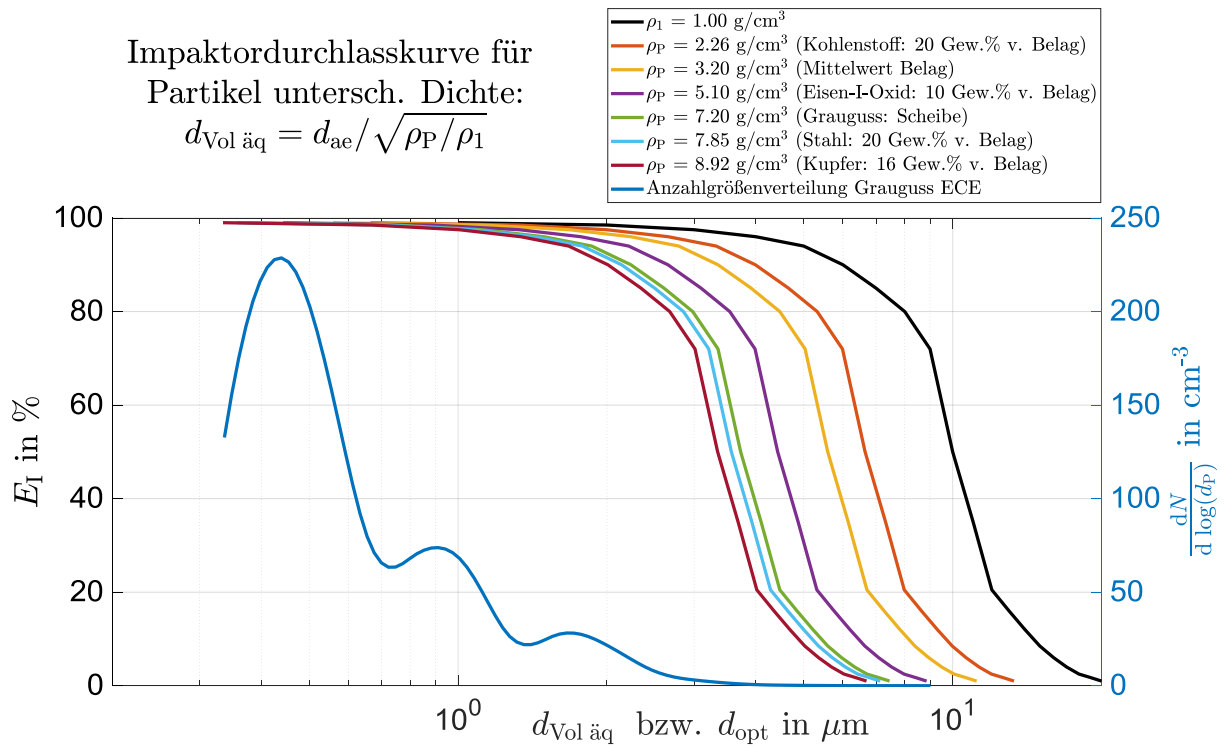


Abbildung 74: Theoretische Impaktordurchlasskurve¹⁴² für verschiedene Partikeldichten (linke y-Achse) und gemessene Anzahlkonzentrationsverteilung (rechte y-Achse) einer Grauguss-ECE-Reibpaarung

¹⁴² DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Außenluft –Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM10-oder PM2,5-Massenkonzentration; Deutsche Fassung EN 12341:2014 (2014).

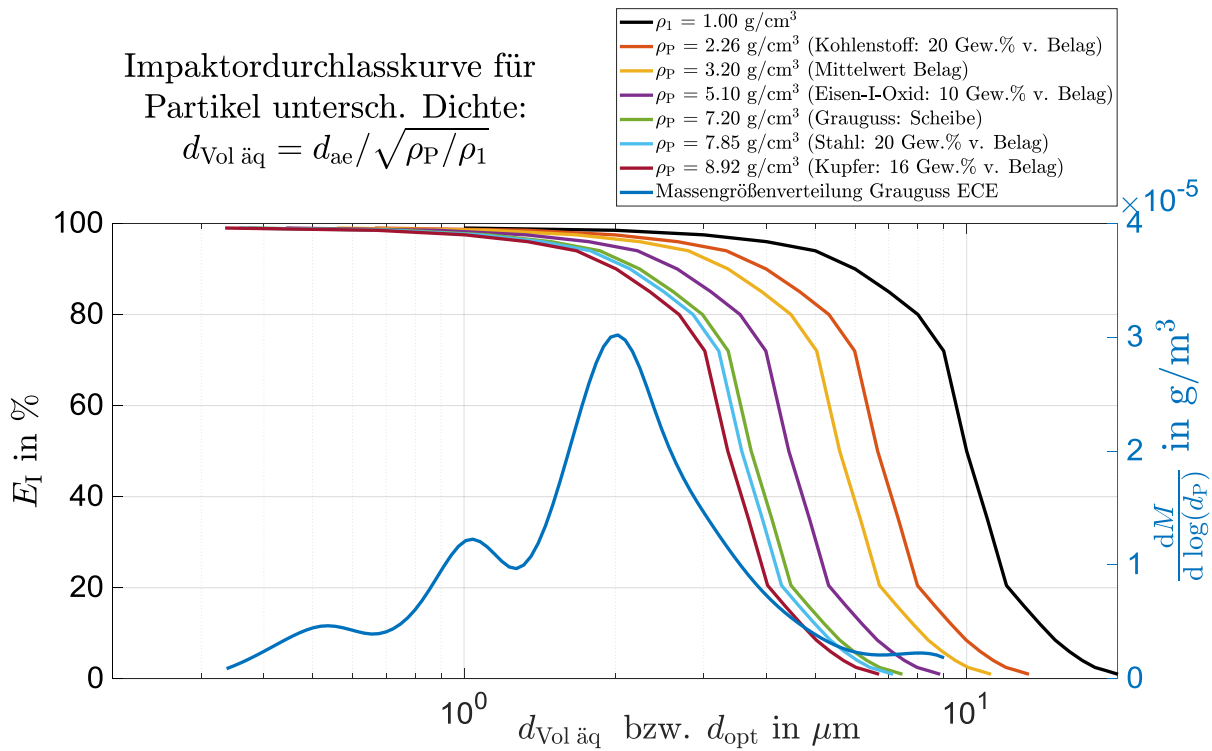


Abbildung 75: Theoretische Impaktordurchlasskurve¹⁴² für verschiedene Partikeldichten (linke y-Achse) und gemessene Massenkonzentrationsverteilung (rechte y-Achse) einer Grauguss-ECE-Reibpaarung

8 Kennfeldbasierte Vorhersage von Bremspartikelemissionen

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Kapiteln 5, 6 und 7 wird der jetzige Kenntnisstand über die Einflussgrößen nachfolgend hinsichtlich ihrer Eignung zur Modellierung diskutiert und in ein Modell überführt.

8.1 Modellbildung

Die Sensitivität der PM_{10} -Emission bezüglich des Bremsdrucks wird in Näherung durch einen linearen Zusammenhang $M \sim p$ beschrieben, der in beiden Kennfeldversuchen nachgewiesen wurde. Die Geschwindigkeit weist einen stärkeren Effekt auf die PM_{10} -Emission auf. Er lässt sich näherungsweise durch einen quadratischen bis kubischen Zusammenhang $M \sim v^2$ bzw. $M \sim v^3$ beschreiben. Beide Einflussgrößen werden anhand der Daten des Kennfeldes „AP-Wechsel“ interpoliert, da ein Wechsel der Arbeitspunkte dem Realbetrieb entspricht. Die verwendeten Kennfeldmittelwerte sind in Abbildung 43 räumlich dargestellt. Die verwendete Interpolationsmethode ist eine Voronoi-Interpolation, die sich Voronoi-Diagrammen bedient, um einen gewichteten Interpolationswert innerhalb der Kennfelddaten zu berechnen. Das Druck-Geschwindigkeitskennfeld stellt somit die Grundlage für die Modellierung dar.

Mittels künstlicher Testsignale, den Temperaturdreiecken, wurde unterhalb einer kritischen Temperatur von ca. 180 °C ein reproduzierbarer Temperatureinfluss auf das PM_{10} -Emissionsverhalten beobachtet. Die Sensitivität der Massenemission bezüglich der Temperatur $m(T_S)$ weist im Rahmen der erhobenen Stichproben eine Varianz auf. Die lineare Näherung der Emission über der Temperatur zeigt diese Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (siehe Anhang Abbildung 87). Für eine Modellierung dieses Effektes reicht der gegenwärtige Kenntnisstand nicht aus. Da der Temperatureinfluss im WLTP zudem nicht von dem Einfluss anderer Störgrößen zu trennen ist (siehe Abbildung 29), wird die Temperatur im Folgenden als Einflussgröße vernachlässigt.

Die Reibhistorie wurde ebenfalls als dominante Einflussgröße identifiziert und führt – je nach Geschwindigkeitsdifferenz zum vorherigen Arbeitspunkt – zu einer temporären Emissionsänderung um bis zu Faktor drei. In Bezug auf den Bremsdruck sind hohe Druckdifferenzen zum vorherigen Arbeitspunkt notwendig (ca. 15 bis 20 bar), um temporäre Emissionsänderungen hervorzurufen. Diese Druckänderung entspricht nicht Realfahrbedingungen im WLTP, zumal die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus Schleppbremsversuchen hin zu Verzögerungsbremssungen nicht bekannt ist. Der Effekt der Reibhistorie wird daher lediglich unter der einfachen Annahme einer Emissionsänderung um das Verhältnis der

Durchschnittsgeschwindigkeit der Vorgängerbremsung zur Durchschnittsgeschwindigkeit der aktuellen Bremsung modelliert:

$$m_{\text{Sim,Reibh.}} = m_{\text{Sim}} \frac{\bar{v}_{\text{vorg}}}{\bar{v}_{\text{akt}}} \quad 8.1$$

Das Ziel dieses Stichversuches besteht darin zu überprüfen, ob sich Grundzüge des Reibhistorienverhaltens im WLTP wiederfinden. Aufgrund des stark vereinfachenden Charakters dieser Annahme wird die Modellierung der Reibhistorie im Folgenden als optionale Einflussgröße zusätzlich zur grundlegenden Kennfeldmodellierung betrachtet und diskutiert, um zu analysieren, ob die grundlegende Abbildung des Reibhistorieneffektes dazu beitragen kann, die Unsicherheit der Modellierung zu verringern.

Emissionen bei nicht betätigter Bremse, sogenannte Off-Brake-Emissionen, weisen eine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit auf, die jedoch stark von den Kontaktbedingungen zwischen Belag und Scheibe abhängt. Dies wurde in Abschnitt 7.1 gezeigt. Da diese Kontaktbedingungen ohne Rückstellmechanismus nicht kontrolliert werden, finden sie bei der Modellierung keine Berücksichtigung und bleiben somit unberücksichtigt.

Das zeitliche Auflösungsvermögen der Messstrecke wurde im Rahmen der Systemidentifikation in Kapitel 5 mit einer Grenzfrequenz von 0,25 Hz beschrieben und fließt im Modell als PT1-Glied derselben Grenzfrequenz ein.

8.2 Simulationsergebnisse

Abbildung 76 stellt die auf Grundlage obiger Modellierung (Kennfeld mit Reibhistorie) generierten Zeitverläufe der kennfeldbasierten Simulation den entsprechenden gemessenen Verläufen zeitlich gegenüber (linke y-Achse). Zudem ist die Differenz der kumulierten Massenemission auf der rechten y-Achse aufgetragen. Für den Fall des WLTP mit einer Schwungmasse von 122 kg m² weicht der kumulierte Emissionsfaktor um 10 % ab. Auffällig sind hierbei die Sprünge der kumulativen Differenz bei ca. 1400 s und 1800 s.

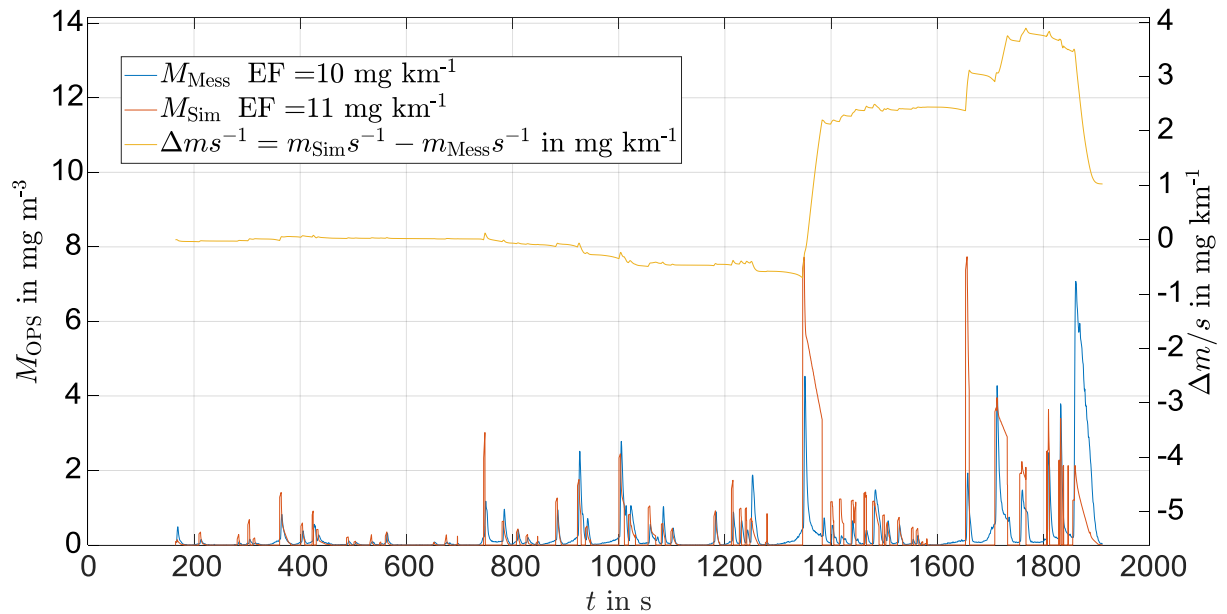


Abbildung 76: Zeitverläufe der gemessenen und simulierten (Druck, Geschwindigkeit und Reibhistorie) Massenkonzentration für einen WLTP mit 122 kgm² (linke y-Achse) sowie die Differenz der kumulierten PM_{10} -Masse (rechte y-Achse) bezogen auf die momentane Strecke $s(t)$

Zur weitergehenden Prüfung des Modells wurde die Schwungmasse im Prüfstandsversuch variiert. Dies entspricht der Simulation variabler Fahrzeugmassen. Neben der eingangs erwähnten Schwungmasse von 122 kgm² wurden Messungen bei 76 kgm² und 99 kgm² durchgeführt. Als Resultat dieser Variation änderten sich der mittlere hydraulische Bremsdruck pro Bremsung (Mittelwert von Beginn der hydraulischen Betätigung bis zu deren Ende) und somit auch die simulierten Emissionsfaktoren (Abbildung 77). Der qualitative Trend eines ansteigenden Emissionsfaktors über dem Trägheitsmoment bzw. über dem mittleren Bremsdruck wird von beiden Simulationsmodellen (mit und ohne Reibhistorie) abgebildet (siehe Abbildung 77 und Abbildung 78). Jedoch weichen beide Voraussagen vom Unsicherheitsintervall der Messung ab. Die Sensitivität des Modells mit Reibhistorie bezüglich des mittleren Bremsdruckes fällt etwas geringer aus als die der reinen Kennfeldmodellierung (ohne Reibhistorie), deren Emissionsfaktoren 10 bis 20 % unterhalb der unteren Messunsicherheitsgrenze liegen.

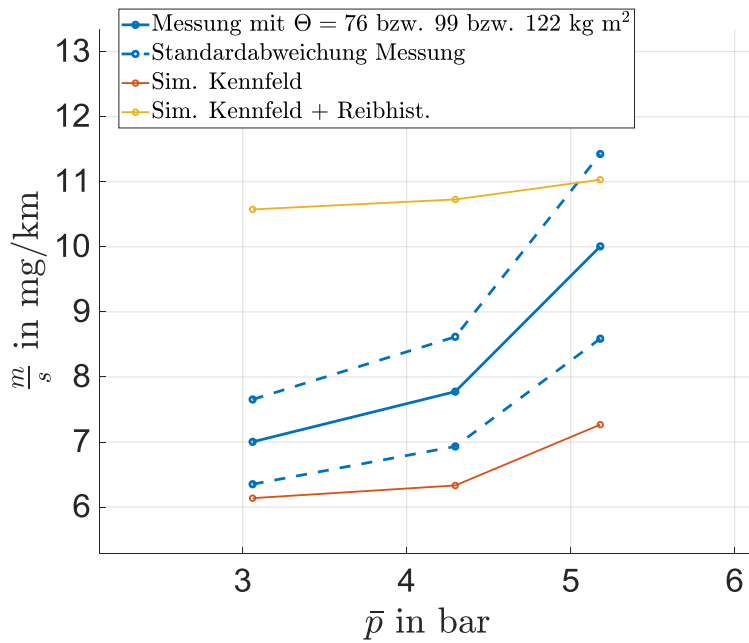


Abbildung 77: Gemessene und simulierte Emissionsfaktoren für drei Trägheitsmomente über dem mittleren Bremsdruck mit zwei Modellen (1. Druck, Geschwindigkeit. 2. Druck, Geschwindigkeit und Reibhistorie)

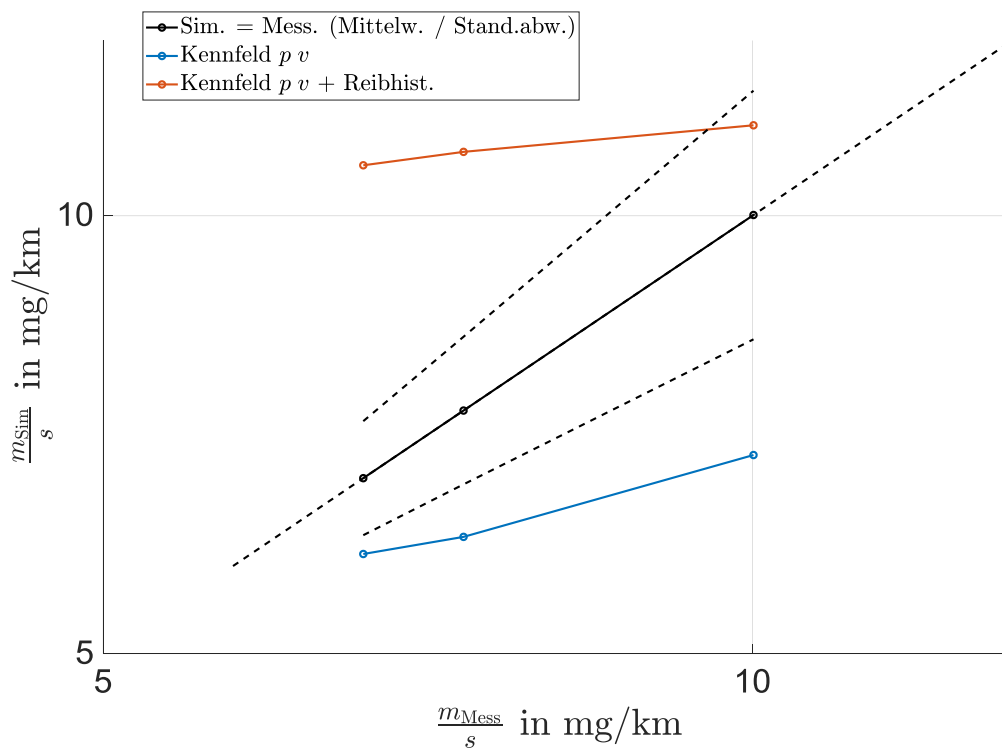


Abbildung 78: Simulierte Emissionsfaktoren (aus Abbildung 77) aufgetragen über den gemessenen Emissionsfaktoren

8.3 Diskussion

Zur Analyse der Korrelation bzw. der Differenzen zwischen Messung und kennfeldbasierter Modellierung sind in Abbildung 79 und Abbildung 80 die simulierte und gemessene Massenemission pro Bremsung aufgetragen. Es ist zudem der ideale Zusammenhang (Simulation gleich Messung), die auf Grundlage der Kennfeldstreuung geschätzte Simulationsunsicherheit sowie die Messunsicherheit in der WLTP-Messung eingezeichnet. Die simulierte und gemessene Massenemission pro Bremsung korrelieren zu einem Großteil der Bremsungen innerhalb der genannten Unsicherheiten. Dennoch liegen mehrere Messintervalle (blaue Linien) außerhalb der geschätzten Simulationsunsicherheit. Mit Ausnahme von fünf Bremsungen liegen alle simulierten Werte innerhalb eines Bereichs, der maximal um den Faktor vier abweicht. Dies ist anhand von gelb gestrichelten Geraden visualisiert.

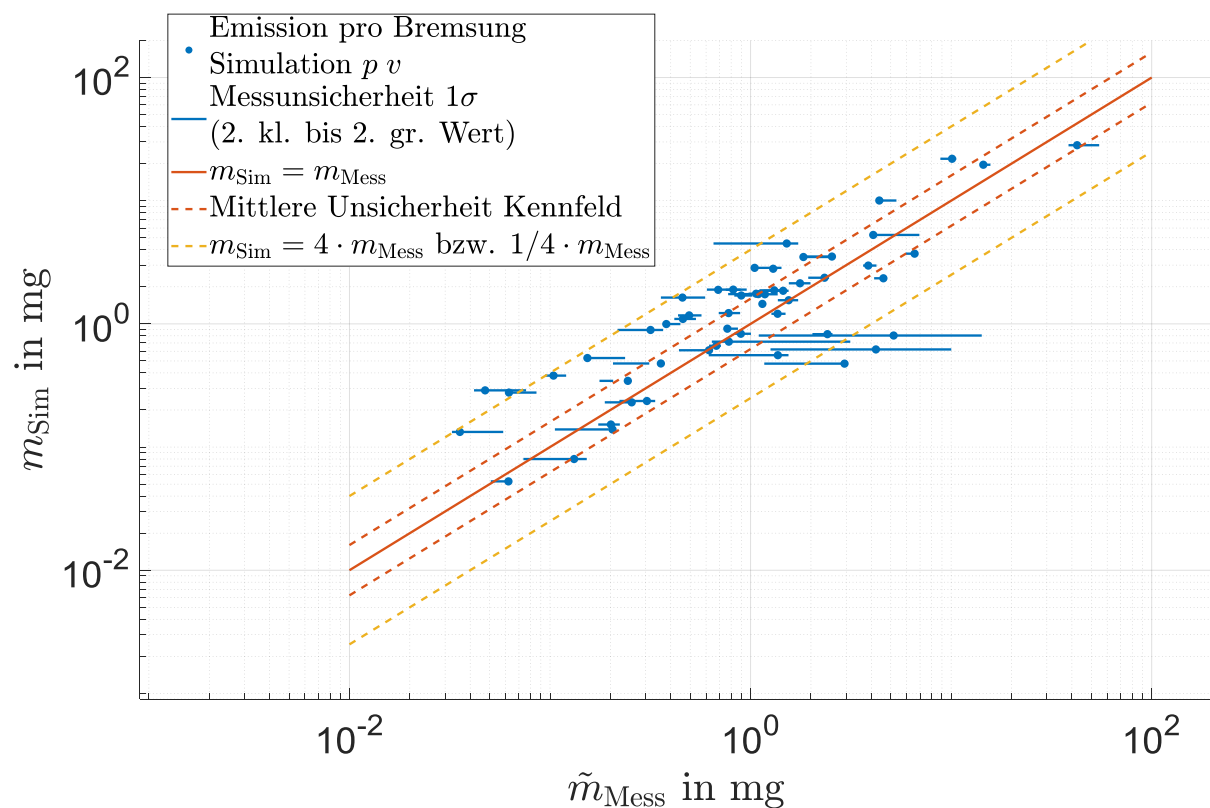


Abbildung 79: Korrelation zwischen simulierter (Kennfeld ohne Reibhistorie) und gemessener Massenemission pro Bremsung in den 55 Einzelbremsungen des WLTP.

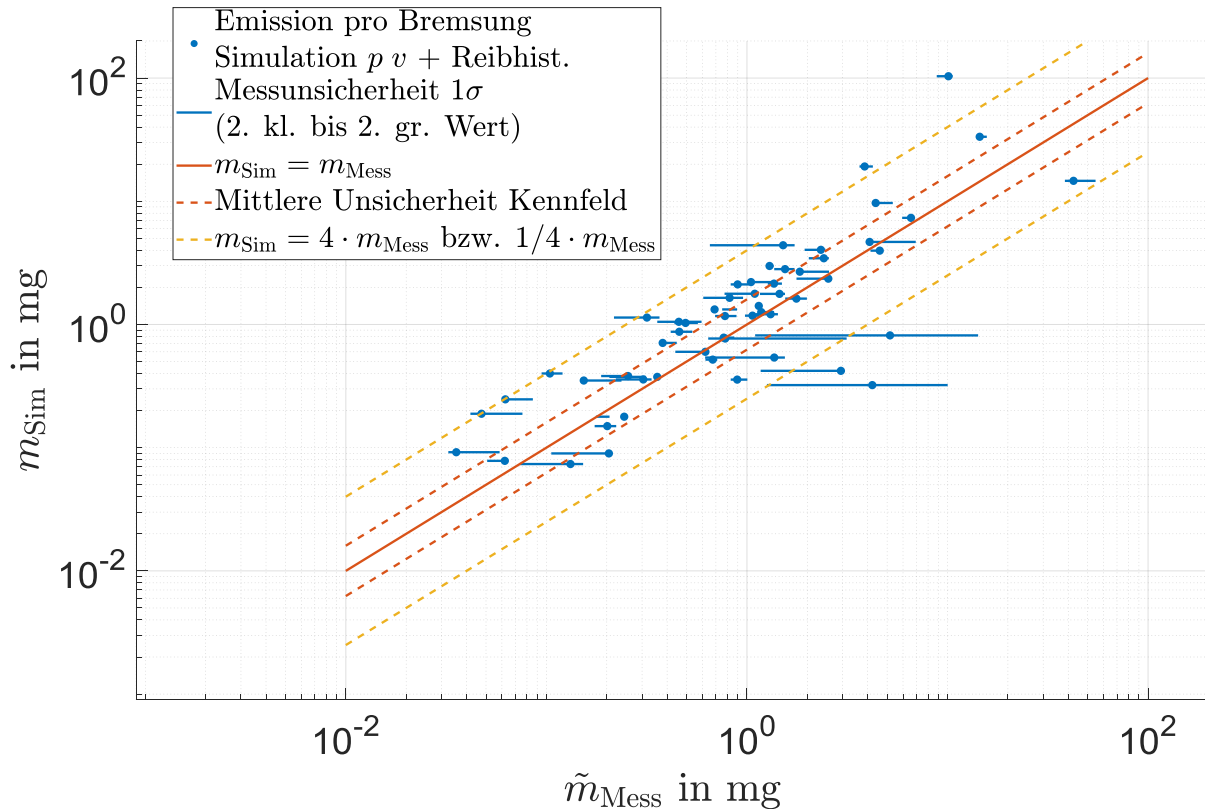


Abbildung 80: Korrelation zwischen simulierter (Kennfeld und Reibhist.) und gemessener Massenemission pro Bremsung in den 55 Einzelbremsungen des WLTP.

Für die weitergehende Analyse der beschriebenen Differenzen sind in Abbildung 81 und Abbildung 82 die Quotienten aus simulierter und gemessener Massenemission pro Bremsung über den Einflussgrößen Bremsdruck, Geschwindigkeit, Temperatur und Reibhistorie (in Form des Quotienten $\frac{v_{\text{vorg}}}{v_{\text{akt}}}$) aufgetragen. Aus der Darstellung geht hervor, dass die Abweichungen für beide Modelle im Falle aller genannten Einflussgrößen nach oben und unten streuen. Dieses Ergebnis legt nahe, dass trotz der in Abbildung 80 gezeigten Korrelation mindestens eine unbekannte Einflussgröße das PM_{10} -Emissionsverhalten beeinflusst und diese nicht durch das vorgestellte Modell abgebildet wird. Trotz dieser Differenz unbekannten Ursprungs zeigt das Druck-Geschwindigkeits-Kennfeld in Bezug auf die kumulierten Emissionsfaktoren und deren Abhängigkeit vom Trägheitsmoment ermutigende Ergebnisse. Für eine zukünftige Modellierung verbleiben folgende Fragestellungen:

1. Wieso weisen die kumulierten Emissionsfaktoren wesentlich geringere Abweichungen auf als die Emissionen pro Bremsung auf? Steht dieses Phänomen in Zusammenhang mit einem nicht abgebildeten Reservoirverhalten?
2. Wie kann der Effekt der Reibhistorie insbesondere in Form von Reservoirwirkungen modelliert werden?
3. Welchen Beitrag kann die Modellierung von Off-Brake-Emissionen zur Erhöhung der Vorhersagegüte von Einzelbremsungen leisten? Wie kann Off-Brake-Emission ggf. unter Zuhilfenahme von Rückstellmechanismen modelliert werden?

4. Wie kann der Temperatureinfluss in Abhängigkeit verschiedener Druck- und Geschwindigkeitsarbeitspunkte modelliert werden?
5. Wie reproduzierbar sind die beschriebenen Unsicherheiten bezüglich der Vorhersagegüte?
6. Welche bisher nicht berücksichtigten Einflussgrößen sind ggf. für die hohe (bis zu Faktor vier) Abweichung pro Einzelbremsung ursächlich?

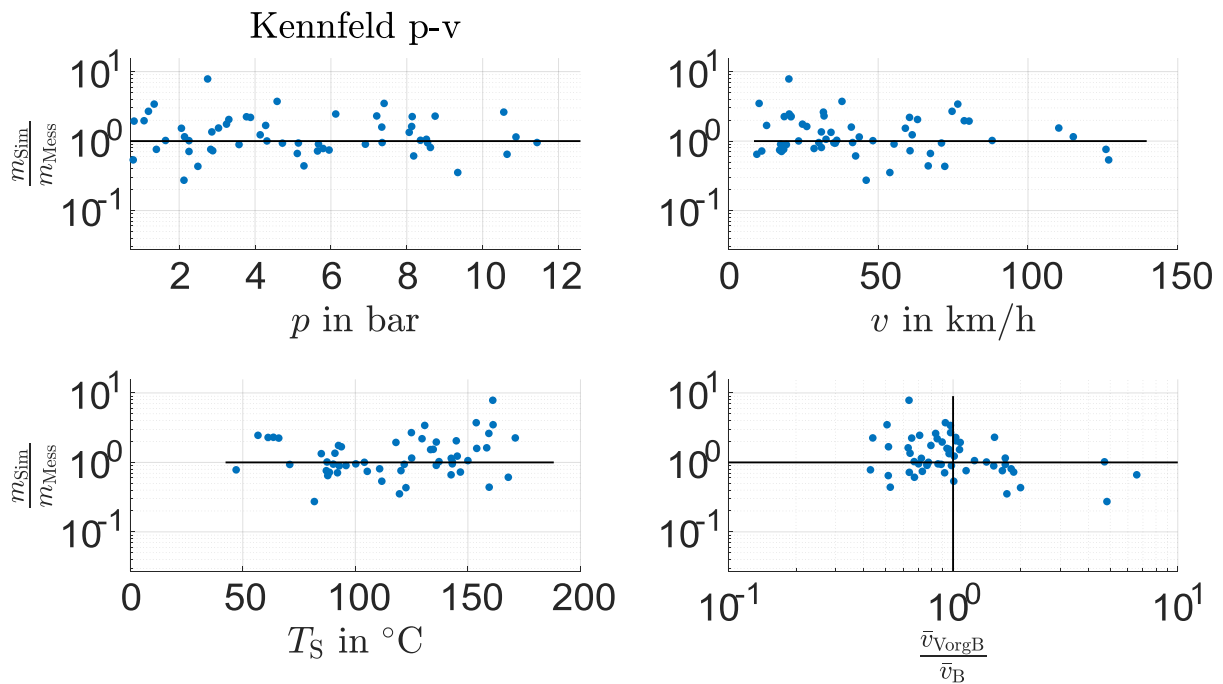


Abbildung 81: Quotienten aus simulierter und gemessener Massenemission pro Bremsung über den Einflussgrößen Bremsdruck, Durchschnittsgeschwindigkeit pro Bremsung, durchschnittliche Scheibentemperatur pro Bremsung und Reibhistorie für das Druck-Geschwindigkeits-Kennfeld

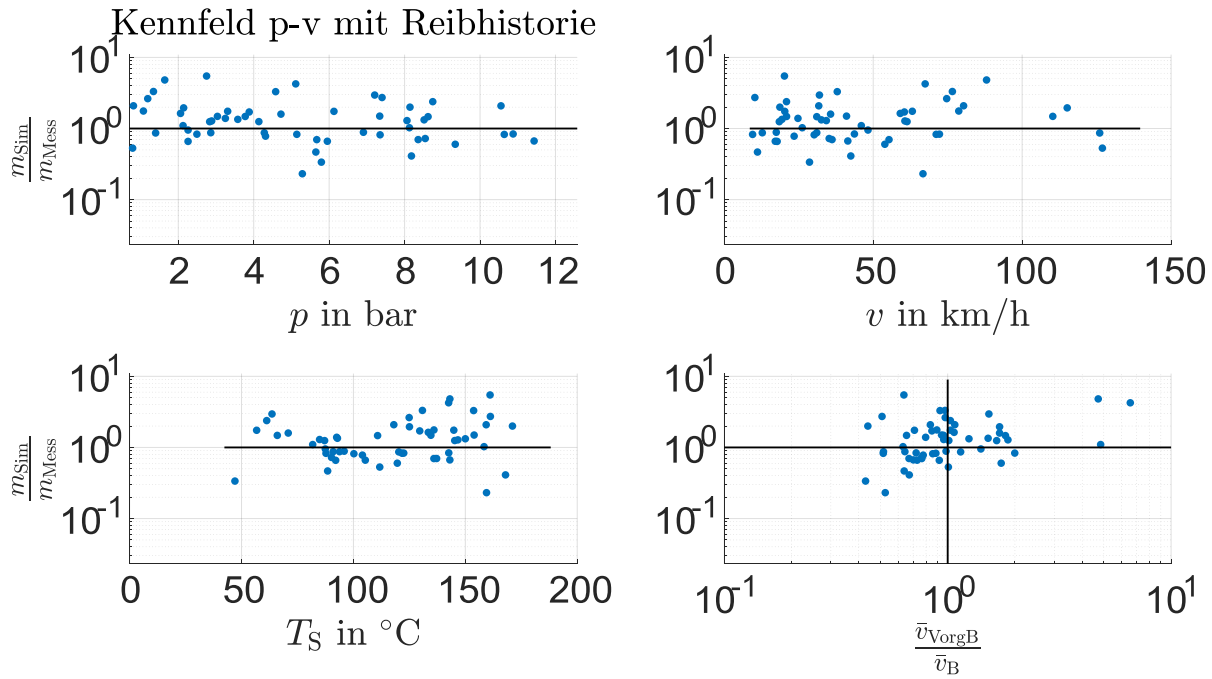


Abbildung 82: Quotienten aus simulierter und gemessener Massenemission pro Bremsung über den Einflussgrößen Bremsdruck, Durchschnittsgeschwindigkeit pro Bremsung, durchschnittliche Scheibentemperatur pro Bremsung und Reibhistorie für das Druck-Geschwindigkeits-Kennfeld mit Reibhistorienmodellierung

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die zentralen Erkenntnisse sowie die darauf abgeleiteten neuen Fragestellungen sind im Folgenden entsprechend der Forschungsstruktur der Arbeit aufgelistet.

1. Zeitliche Auflösung der Messstrecke

Die zeitliche Auflösung der Messstrecke wurde untersucht, um Ausgangssignale zeitlich korrelierten Eingangssignalen zuordnen zu können. Die Systemidentifikation mit harmonischen Testsignalen ergab eine maximale identifizierbare Systemausgangsfrequenz von ca. 0,25 Hz.

2. Effekt der Bremsscheibentemperatur auf die Emission von PM_{10} und ultrafeinen Partikeln

Der Effekt der Scheibentemperatur auf die PM_{10} -Emission ist im Rahmen der erhobenen Stichprobe reproduzierbar mit einem Anstieg um ca. Faktor zwei bei einer Temperaturerhöhung von 80 °C auf 160 °C identifiziert worden. Oberhalb einer kritischen Temperatur von ca. 180 °C weist die Temperaturabhängigkeit ein Hystereseverhalten auf. Aus der Literatur sind Zersetzungsprozessen organischer Belagbestandteile bekannt, die im gleichen Temperaturbereich auftreten. Diese Zersetzungsprozesse wurden im Stand der Forschung bereits als ursächlich für die Generierung ultrafeiner Partikel angenommen. Die Beobachtungen dieser Arbeit stützen diese Hypothese. Es verbleibt die Frage, welche Interaktionseffekte von Temperatur, Bremsdruck und Geschwindigkeit auf die Massenemission existieren. Die Beantwortung dieser Fragestellung wäre insbesondere dahingehend von Interesse, um die Einflussgröße Temperatur nicht nur eindimensional im Sinne eines Zusammenhangs $m(T)$ zu betrachten, sondern in Interaktion mit Druck bzw. Geschwindigkeit $m(T,p,v)$ in einer zukünftigen Modellbildung zu berücksichtigen.

3. Effekt der Betriebshistorie

Im Zusammenhang mit Reibwertuntersuchungen sind zeitvariante Effekte der Bremse bereits im Stand der Forschung bekannt. Das Emissionsverhalten weist ebenfalls eine Zeitvarianz auf, die durch die Reibhistorie der Bremse verursacht wird. Dieser Effekt verursacht eine temporäre Überhöhung bzw. Reduzierung der PM_{10} -Emission pro Bremsung um bis zu Faktor drei. Mikroskopische Aufnahmen der Belagoberfläche stützen das aus der Literatur bekannte Erklärungsmodell des Reservoirverhaltens als Ursache für dieses zeitvariante Phänomen. Dementsprechend führen niedrige Bremsgeschwindigkeiten und hohe Bremsdrücke zu einem Anstieg der im Reservoir gespeicherten Verschleißpartikel. In Folgebremsungen bei hohen Geschwindigkeiten oder niedrigen Bremsdrücken werden diese Partikel entsprechend der Modellvorstellung emittiert und führen zu einer temporären Überhöhung der Emission. Im Falle einer umgekehrten Reihenfolge (von hohen zu niedrigen Geschwindigkeiten bzw. von niedrigen zu hohen Drücken) tritt der

gegenteilige Effekt in Form einer temporären Emissionsverringerung auf. Dieser gegenteilige Effekt stützt ebenfalls das Erklärungsmodell des Reservoirs, das bei hohen Geschwindigkeiten (oder niedrigen Bremsdrücken) geleert wird und daher anschließend temporär weniger gespeicherte Verschleißpartikel freisetzen kann.

4. Effekt von Bremsdruck und Geschwindigkeit

Bezüglich der Betriebspunkte wurde die Reibgeschwindigkeit im Vergleich zum Bremsdruck als dominante Einflussgröße identifiziert. Sie hat einen näherungsweise quadratischen bis kubischen Effekt auf die PM_{10} -Emission. Die mittlere Partikelgröße im groben und feinen Größenbereich weist zudem eine Verschiebung hin zu kleineren Partikelgrößen bei Erhöhung der Geschwindigkeit auf. Die ursächlichen Mechanismen für den quadratischen bis kubischen Zusammenhang sowie für die Verschiebung der Größenverteilung sind eine der zentralen Forschungsfragen, die sich aus der vorliegenden Arbeit ableiten. Im Zusammenhang mit der Diskussion der Korrelation von PM_{10} -Emission und Verschleiß besteht die Hypothese, dass Verschleißpartikel bei niedrigen Reibgeschwindigkeiten nicht in ausreichend kleinem Durchmesser generiert oder emittiert werden, um die PM_{10} -Abscheidung zu passieren. Als Folge dessen könnte sich der Anteil von PM_{10} an der Gesamtheit luftgetragener Verschleißpartikel geschwindigkeitsabhängig ändern und somit bei hohen Geschwindigkeiten mehr luftgetragene Partikel unterhalb eines aerodynamischen Durchmessers von $10\text{ }\mu\text{m}$ vorliegen.

5. Emission bei nicht betätigter Bremse und Belagrückstellung

Mehrere Beobachtungen der vorliegenden Arbeit weisen darauf hin, dass der Großteil der Emissionen bei nicht betätigter Bremse (Off-Brake-Emission) aus einem Belagreservoir gespeist wird. Die Erkenntnisse stützen somit das aus dem Stand der Forschung bekannte Phänomen des Verschleißpartikelreservoirs in den Kavitäten des Belages. Der Großteil der Off-Brake-Emission lässt sich daher zwar mittels Belagrückstellung vermeiden, jedoch trägt er nicht in signifikantem Maße zur Reduktion der Gesamtemission bei. Die jetzigen Erkenntnisse werfen die Frage auf, ob und in welchem Umfang Restschleifmomente zur PM_{10} -Gesamtemission beitragen bzw. welcher Stichprobenumfang erforderlich ist, um den Effekt von Restschleifmomenten auf PM_{10} -Emissionsfaktoren nachzuweisen.

Als ursächliche Mechanismen für die Off-Brake-Emission verbleiben zwei Erklärungsansätze. Beide Erklärungsmodelle setzen das Vorhandensein eines Reservoirs voraus, wobei im ersten Modell ein mechanischer Kontakt zwischen Belag und Scheibe (Restschleifmoment) als Ursache für die Emission angeführt wird und im zweiten Modell ein Luftvolumenstrom zwischen Belag und Scheibe ursächlich für das Herauslösen von Reservoirpartikeln ist. Für die untersuchten Luftspaltbreiten von mindestens $170\text{ }\mu\text{m}$ kann das zweite Erklärungsmodell lediglich nur für eine geringe Menge an Off-Brake-Emissionen ursächlich sein. Zur Überprüfung der Hypothese, dass Off-Brake-Emissionen durch einen Luftstrom zwischen Belag und Scheibe hervorgerufen werden, könnte eine messtechnische Erfassung des dynamischen Druckes zwischen Belag und Scheibe mit Hilfe von Druckbohrungen in die Belagrückenplatte zielführend sein, um einen potentiell-

len Zusammenhang zwischen dynamischem Unterdruck bzw. Luftvolumenstrom und Off-Brake-Emissionen zu überprüfen.

6. Modellierung von Bremspartikelemissionen

Anhand der oben beschriebenen Erkenntnisse wurden PM_{10} -Emissionen kennfeldbasiert in Fahrzyklen vorhergesagt. Die kumulierte Abweichung liegt in drei exemplarischen Lastfällen (WLTP mit drei verschiedenen Trägheitsmomenten) bei maximal 40 % für den PM_{10} -Emissionsfaktor. Der ansteigende Verlauf des PM_{10} -Emissionsfaktors über dem mittleren Bremsdruck wird innerhalb der erhobenen Stichprobe durch die kennfeldbasierte Vorhersage abgebildet. Für ca. zwei Drittel der Bremsungen im WLTP überschneiden sich die Unsicherheitsintervalle von Simulation und Messung. Die maximalen Abweichungen der Simulation in Bezug auf die Emission pro Einzelbremsung liegen im WLTP innerhalb eines Intervalls der Größenordnung Faktor vier um die Messungen. Eine Analyse der Abweichung pro Einzelbremsung ergibt keine Korrelation zu bekannten Einflussgrößen. Es bleibt offen, ob die Modellierung anderer, bisher unbekannter Einflussgrößen, diese Varianz senken kann.

Der in den vorangegangenen Abschnitten formulierte Forschungsausblick der vorliegenden Arbeit bildet den Bezug zum eingangs zitierten Verständnis von Karl Popper bezüglich des Erkenntnisgewinns durch Forschung.

“The more we learn about the world, and the deeper our learning, the more conscious, specific, and articulate will be our knowledge of what we do not know;”

Die vorliegende Arbeit leistet somit einen Beitrag zum Stand der Forschung, indem sie das vorhandene empirische Wissen über die Einflussgrößen Bremsdruck, Geschwindigkeit, Temperatur, Reibhistorie und Belagrückstellung erweitert, deren ursächliche Mechanismen diskutiert und die sich daraus ergebenden Erkenntnislücken in Form neuer Forschungsfragen konkretisiert.

A Anhang

A.1 Methodik zur Berechnung der Anzahlemission pro Bremsung

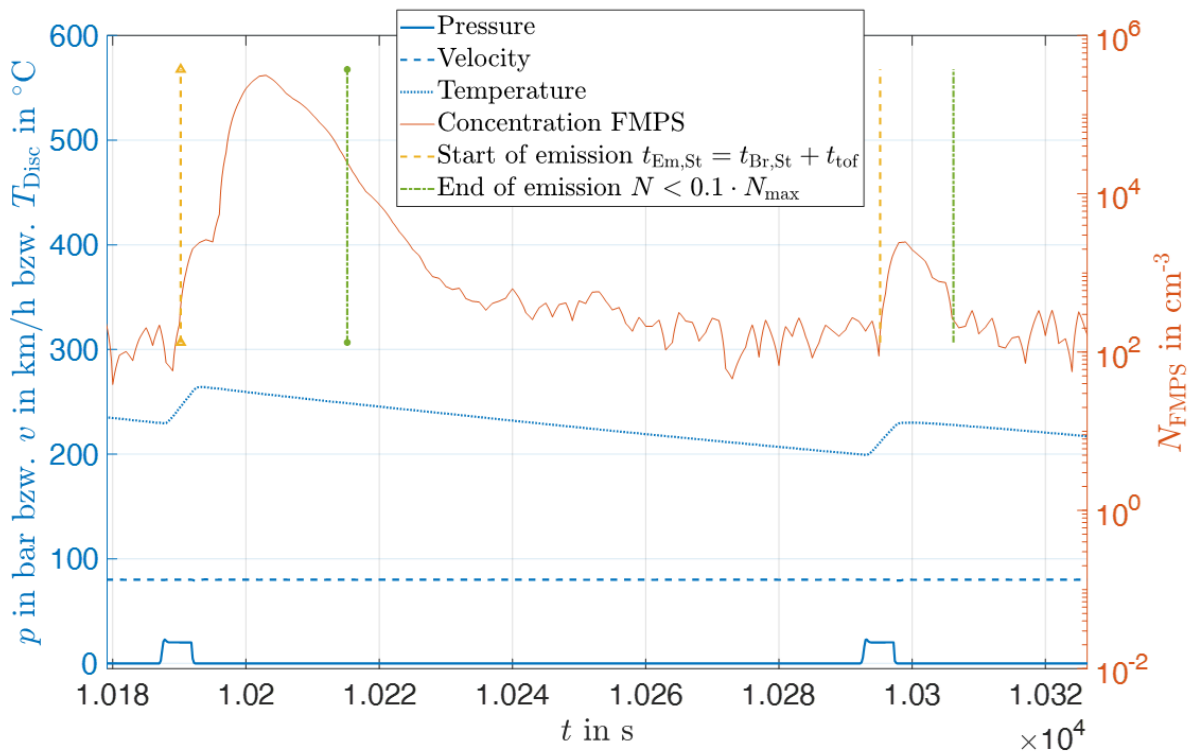


Abbildung 83: Insbesondere im Falle ultrafeiner Partikel variiert die Emissionsdauer. Als standardisierte Bewertungsgröße wird daher die kumulierte Partikelanzahl ab Emissionsstart (Beginn der Bremsung plus Totzeit der Messstrecke) bis zu dem Zeitpunkt definiert, an dem die Anzahlkonzentration kleiner als 10 % der in dieser Bremsung erreichten Maximalkonzentration ist.

A.2 Methodik zur Systemidentifikation des Versuchsaufbaus

Als Voraussetzung für die Einflussgrößenanalyse am Schwungmassenprüfstand ist die Kenntnis über die zeitliche Auflösung der Messstrecke (von Scheibenbremse über Partikelprobenahme bis zu den Echtzeitmessgeräten) erforderlich. Zur Bestimmung der zeitlichen Auflösung finden harmonische Testsignale Anwendung, die in einer vorange-

gangenen Publikation beschrieben wurden¹⁴³. Diese Methode ist aus der Systemidentifikation bekannt¹⁴⁴. Das zu Grunde liegende Prinzip besteht im Aufprägen eines (harmonischen) Testsignals auf den Systemeingang, um eine periodische Antwort des Systems zu erwirken. Die Analyse der Ein- und Ausgangssignale des Systems mittels einer Fast Fourier Transformation ermöglicht die Identifikation der periodischen Anteile der Ein- und Ausgangssignale. Die periodischen Anteile sind insbesondere durch ihre Amplitude und Frequenz charakterisiert. Zur Bestimmung der zeitlichen Auflösung der Messstrecke erfolgt eine Anregung mittels mehrerer Frequenzen. Ein Vergleich der periodischen Ausgangssignalamplitude (Systemantwort) mit den Eingangssignalamplituden, die weder der Anregungsfrequenz noch deren Harmonischen zugeordnet werden können (und somit dem „Hintergrund“ zugeordnet werden), ermöglicht eine Aussage darüber, bis zu welcher Anregungsfrequenz eine zeitlich korrelierte Systemantwort dem Eingangssignal zugeordnet werden kann. Die Methodik ist exemplarisch in Abbildung 84 visualisiert. Die mittels dieser Methodik generierten Ergebnisse sind Gegenstand von Kapitel 5.

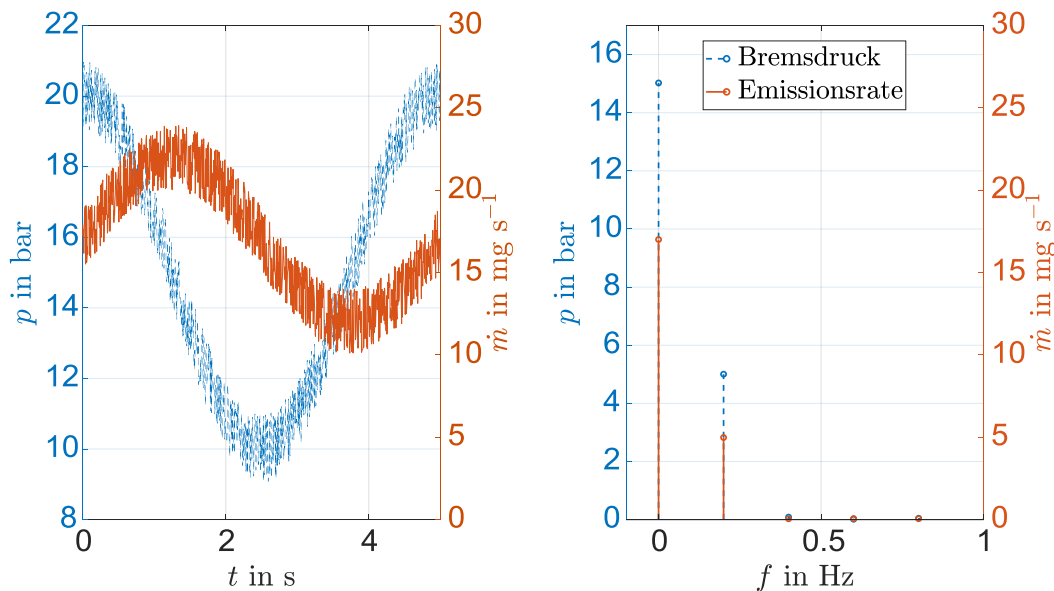


Abbildung 84: Visualisierung der Untersuchungsmethodik zur Bestimmung der zeitlichen Auflösung der Messstrecke anhand von künstlich erzeugten Daten. Eingangs- und Ausgangssignal im Zeitbereich (links) und nach Fast Fourier Transformation im Frequenzbereich (rechts). Bei der exemplarischen Druckerregung mit 15 ± 5 bar bei 0,2 Hz antwortet das hypothetische System mit einer Emissionsrate von 17 ± 5 mg s^{-1} bei ebenfalls 0,2 Hz.

¹⁴³ Nach Niemann, H. et al.: System Identification Method for Brake Emission Measurements (2018).

¹⁴⁴ Isermann, R.: Mechatronische Systeme (2008), S. 336.

A.3 Variation von harmonischer Druck- und Geschwindigkeitsamplitude

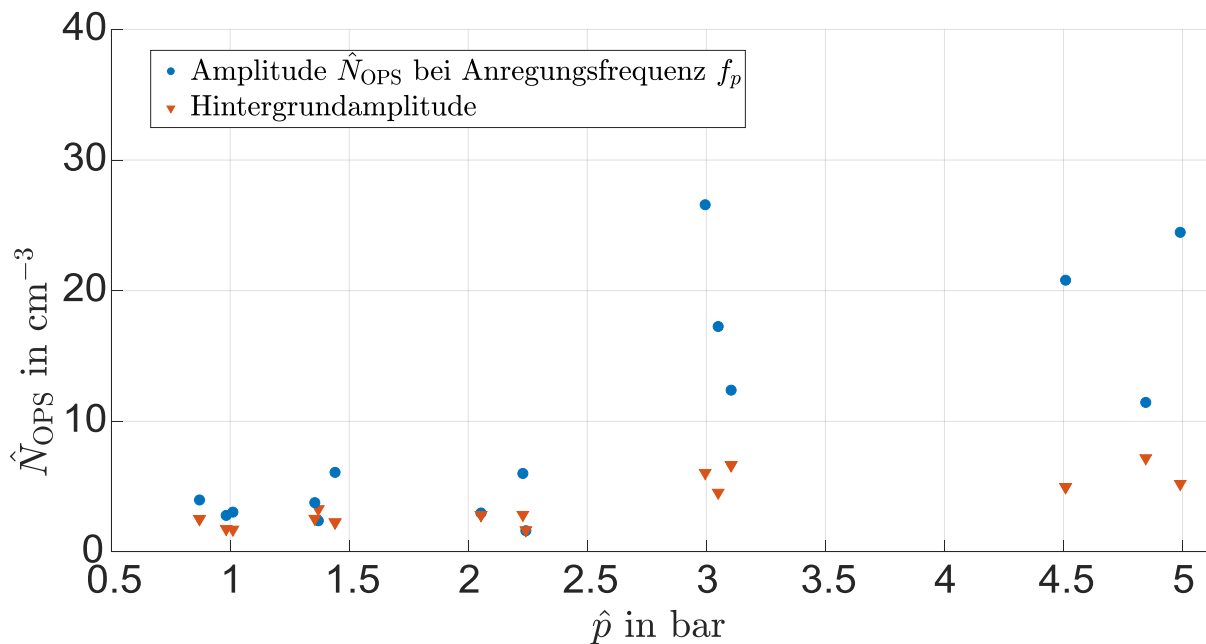


Abbildung 85: Amplitude der mit dem OPS gemessenen Anzahlkonzentration (Systemantwort) über der Bremsdruckamplitude (Systemanregung) für fünf Anregungsamplituden und drei Wiederholungen pro Anregungsamplitude

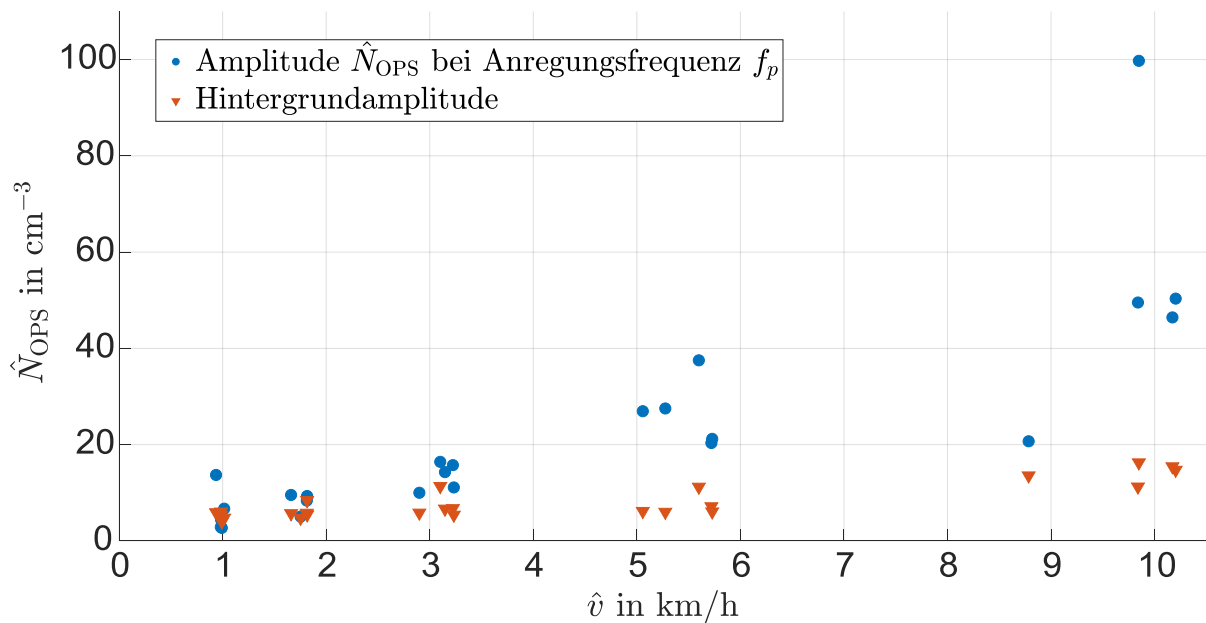


Abbildung 86: Amplitude der mit dem OPS gemessenen Anzahlkonzentration (Systemantwort) über der Geschwindigkeitsamplitude (Systemanregung) für fünf Anregungsamplituden und fünf Wiederholungen pro Anregungsamplitude

A.4 Temperatureinfluss auf PM10 in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

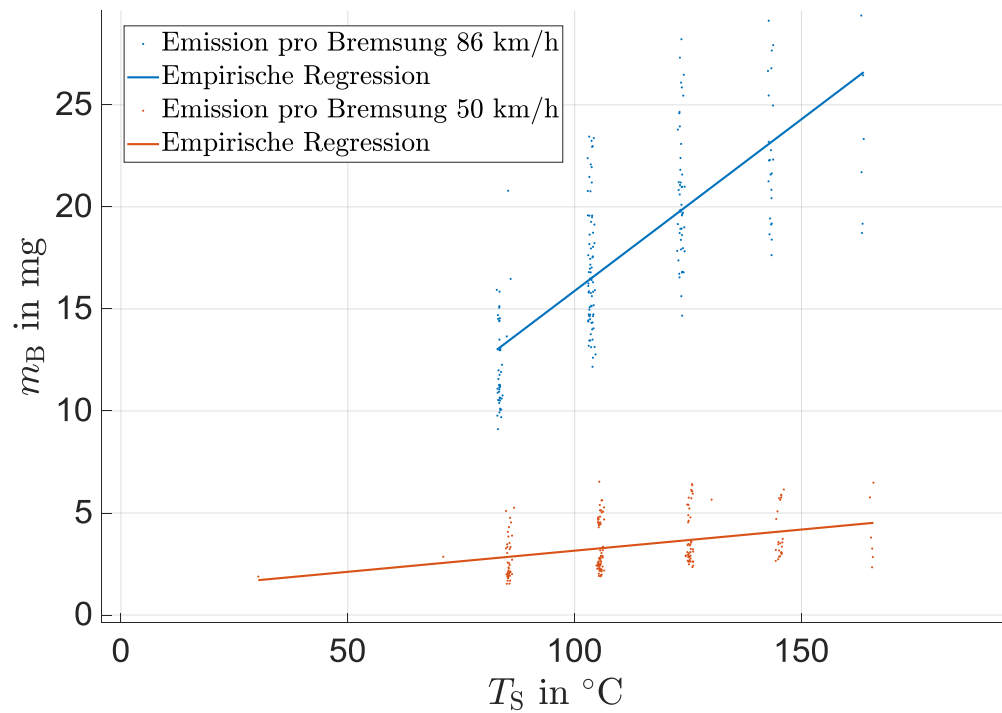


Abbildung 87: Lineare Regression der emittierten Masse pro Bremsung über der Bremsscheibentemperatur für zwei Geschwindigkeiten in Versuchen mit Temperaturdreiecken.

A.5 Druckluftversuch bzgl. Reservoirmodell

Druckluftstöße auf Luftspalt zwischen Scheibe und Belägen

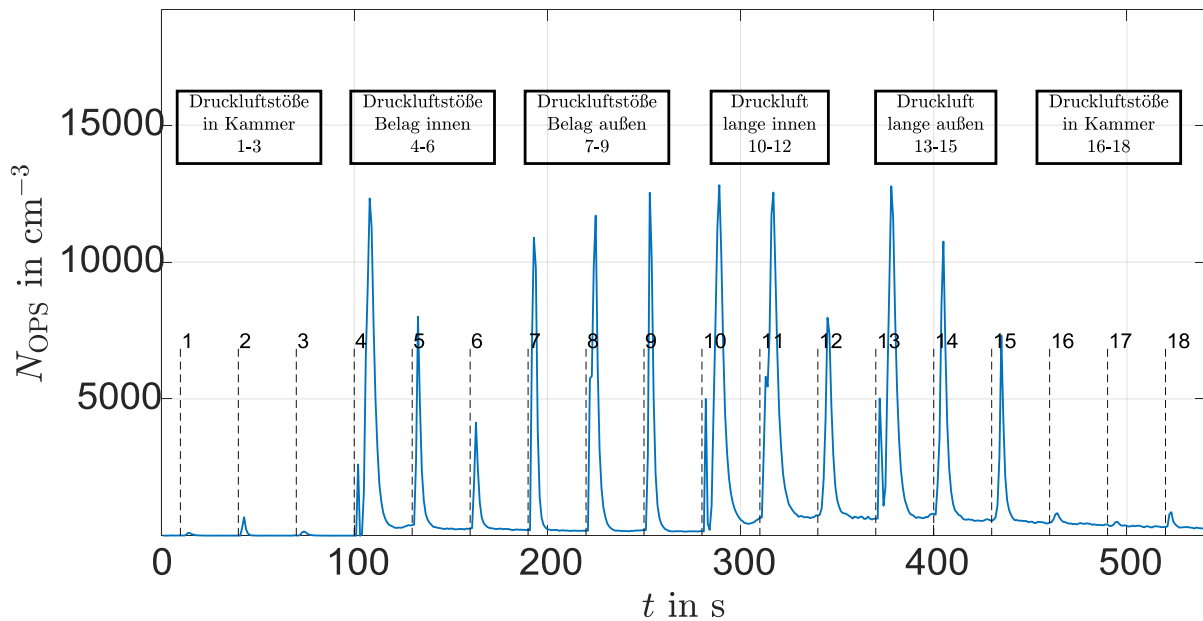


Abbildung 88: Gemessene Anzahlkonzentration über der Zeit nach 18 Druckluftstößen in die Einhausung, auf einen Punkt an der Luftspaltoberkante des inneren und äußeren Belages sowie entlang der Luftspaltoberkanten des inneren und äußeren Belages. Korreliert mit den Druckluftstößen auf die Beläge tritt Emission von PM_{10} auf, was ein Indiz für das Vorhandensein eines PM_{10} -Reservoirs in der Belagoberfläche ist.

A.6 Mittlere Scheibentemperatur mit und ohne Belagrückstellung

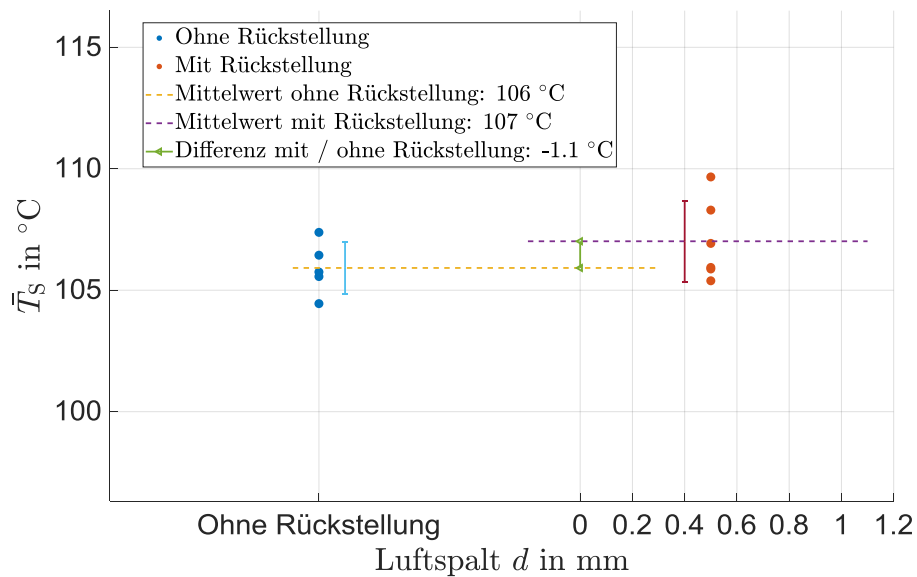


Abbildung 89: Mittelwerte der Scheibentemperatur während des WLTP mit und ohne Belagrückstellung, gemessen mit einem eingebetteten Thermoelement. Es trat kein signifikanter Temperaturunterschied auf, da die Standardabweichung höher als die Differenz der Mittelwerte ist.

Literaturverzeichnis

Agudelo, C. et al.: Systematic assessment of the influence of test setup, test procedure and friction material on brake emissions during inertia dynamometer tests (2016)

Agudelo, Carlos; Deacon, Peter; Tiwari, Andrea; Hortet, Alejandro; Anderson, Robert; Markiewicz, Radoslaw; Marschall, Matthew: Systematic assessment of the influence of test setup, test procedure and friction material on brake emissions during inertia dynamometer tests, in: FISITA (Hrsg.): Proceedings of EuroBrake 2016, Milan, Italy, 2016

Alemaní, M. et al.: On the influence of car brake system parameters on particulate matter emissions (2018)

Alemaní, Mattia; Wahlström, Jens; Olofsson, Ulf: On the influence of car brake system parameters on particulate matter emissions, in: Wear 396-397, S. 67–74, 2018

Asbach, C. et al.: Entstehung und Möglichkeiten zur Messung von Fein- und Ultrafeinstaub beim Bremsen (2018)

Asbach, Christof; Todea, Ana M.; Zessinger, Marco, et al. (Hrsg.) Entstehung und Möglichkeiten zur Messung von Fein- und Ultrafeinstaub beim Bremsen, Proceedings, Jahrgang 2018, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018

Baron, P. A. et al.: Aerosol measurement (2011)

Baron, Paul A.; Kulkarni, Pramod; Willeke, Klaus: Aerosol measurement, 3. Auflage, Wiley, Hoboken N.J., 2011

Breuer, B.; Bill, K. H.: Bremsenhandbuch (2017)

Breuer, Bert; Bill, Karlheinz H.: Bremsenhandbuch, ATZ / MTZ-Fachbuch, 5. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Außenluft –Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM10-oder PM2,5-Massenkonzentration des Schwebstaubes; Deutsche Fassung EN 12341:2014 (2014)

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: , DIN EN 2014: Außenluft –Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM10-oder PM2,5-Massenkonzentration des Schwebstaubes; Deutsche Fassung EN 12341:2014, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014

Eriksson, M. et al.: Wear and contact conditions of brake pads: dynamical in situ studies of pad on glass (2001)

Eriksson, Mikael; Lord, John; Jacobson, Staffan: Wear and contact conditions of brake pads: dynamical in situ studies of pad on glass, in: Wear, Jahrgang 2001, S. 272–278, 2001

Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: On-road vehicle measurements of brake wear particle emissions (2019)

Farwick zum Hagen, Ferdinand H.; Mathissen, Marcel; Grabiec, Tomasz; Hennicke, Tim; Rettig, Marc; Grochowicz, Jaroslaw; Vogt, Rainer; Benter, Thorsten: On-road vehicle measurements of brake wear particle emissions, in: Atmospheric Environment, Jahrgang 217, S. 116943, 2019

Farwick zum Hagen, Ferdinand H. et al.: Study of Brake Wear Particle Emissions (2019)

Farwick zum Hagen, Ferdinand H.; Mathissen, Marcel; Grabiec, Tomasz; Hennicke, Tim; Rettig, Marc; Grochowicz, Jaroslaw; Vogt, Rainer; Benter, Thorsten: Study of Brake Wear Particle Emissions, in: Environmental science & technology (9), Jahrgang 53, S. 5143–5150, 2019

Ferdinand H. Farwick zum Hagen: Dissertation, Investigation of Brake Wear Particle Emissions on the Dynamometer and the Vehicle under Real-Driving Simulation (2019)

Ferdinand H. Farwick zum Hagen: Investigation of Brake Wear Particle Emissions on the Dynamometer and the Vehicle under Real-Driving Simulation, Dissertation
Bergischen Universität Wuppertal, Wuppertal, 2019

Gramstat, S.: Methoden der in-situ Visualisierung der Reibzonendynamik trockenlaufender Reibpaarungen unter Ergänzung physikalischer und chemischer Charakterisierungen der Reibpartner (2015)

Gramstat, Sebastian: Methoden der in-situ Visualisierung der Reibzonendynamik trockenlaufender Reibpaarungen unter Ergänzung physikalischer und chemischer Charakterisierungen der Reibpartner, 2015

Gramstat, S.: Investigations of brake particle emissions (2017)

Gramstat, Sebastian (Hrsg.) Investigations of brake particle emissions, 2017

Grigoratos, T.: Workshop – Towards a regulation on brake wear emissions (2021)

Grigoratos, Theodoros: Workshop – Towards a regulation on brake wear emissions; <https://wiki.unece.org/download/attachments/117508405/Brake%20Regulations%20Workshop%20MoM%20Final.pdf?api=v2>, 2021, Zugriff 05.05.2021

Grigoratos, T.; Martini, G.: Brake wear particle emissions (2015)

Grigoratos, Theodoros; Martini, Giorgio: Brake wear particle emissions, in: Environmental science and pollution research international (4), Jahrgang 22, S. 2491–2504, 2015

Hagino, H. et al.: Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating (2015)

Hagino, Hiroyuki; Oyama, Motoaki; Sasaki, Sousuke: Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating, in: Wear334-335, S. 44–48, 2015

Hagino, H. et al.: Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles (2016)

Hagino, Hiroyuki; Oyama, Motoaki; Sasaki, Sousuke: Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles, in: Atmospheric Environment, Jahrgang 131, S. 269–278, 2016

Isermann, R.: Mechatronische Systeme (2008)

Isermann, Rolf: Mechatronische Systeme, 2. Auflage, Springer, Berlin, 2008

Kukutschová, J. et al.: On airborne nano/micro-sized wear particles released from low-metallic automotive brakes (2011)

Kukutschová, Jana; Moravec, Pavel; Tomášek, Vladimír; Matějka, Vlastimil; Smolík, Jiří; Schwarz, Jaroslav; Seidlerová, Jana; Safářová, Klára; Filip, Peter: On airborne nano/micro-sized wear particles released from low-metallic automotive brakes, in: Environmental pollution (Barking, Essex : 1987) (4), Jahrgang 159, S. 998–1006, 2011

Mathissen, M. et al.: A novel real-world braking cycle for studying brake wear particle emissions (2018)

Mathissen, Marcel; Grochowicz, Jaroslaw; Schmidt, Christian; Vogt, Rainer; Farwick zum Hagen, Ferdinand H.; Grabiec, Tomasz; Steven, Heinz; Grigoratos, Theodoros: A novel real-world braking cycle for studying brake wear particle emissions, in: Wear 414-415, S. 219–226, 2018

Mathissen, M. et al.: Brake Wear Particle Emissions of a Passenger Car Measured on a Chassis Dynamometer (2019)

Mathissen, Marcel; Grigoratos, Theodoros; Lahde, Tero; Vogt, Rainer: Brake Wear Particle Emissions of a Passenger Car Measured on a Chassis Dynamometer, in: Atmosphere (9), Jahrgang 10, S. 556, 2019

Mikael Eriksson, Filip Bergman, Staffan Jacobson: On the nature of tribological contact in automotive brakes (2002)

Mikael Eriksson, Filip Bergman, Staffan Jacobson: On the nature of tribological contact in automotive brakes, in: Wear (252), Jahrgang 2002, S. 26–36, 2002

Mosleh, M. et al.: Characteristics and morphology of wear particles from laboratory testing of disk brake materials (2004)

Mosleh, Mohsen; Blau, Peter J.; Dumitrescu, Delia: Characteristics and morphology of wear particles from laboratory testing of disk brake materials, in: Wear 11-12, Jahrgang 256, S. 1128–1134, 2004

Namung, H.-G. et al.: Generation of Nanoparticles from Friction between Railway Brake Disks and Pads (2016)

Namung, Hyeong-Gyu; Kim, Jong-Bum; Woo, Sang-Hee; Park, Sechan; Kim, Minhae; Kim, Min-Soo; Bae, Gwi-Nam; Park, Duckshin; Kwon, Soon-Bark: Generation of Nanoparticles from Friction between Railway Brake Disks and Pads, in: Environmental science & technology (7), Jahrgang 50, S. 3453–3461, 2016

Niemann, H. et al.: System Identification Method for Brake Particle Emission Measurements of Passenger Car Disc Brakes on a Dynamometer (2018)

Niemann, Hartmut; Winner, Hermann; Asbach, Christof; Kaminski, Heinz; Zessinger, Marco: System Identification Method for Brake Particle Emission Measurements of Passenger Car Disc Brakes on a Dynamometer, in: , SAE Technical Paper Series, SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2018

Niemann, H. et al.: Untersuchung des Partikelemissionsverhaltens von Scheibenbremsen unter transienten Lasten (2019)

Niemann, Hartmut; Winner, Hermann; Asbach, Christof, et al. (Hrsg.) Untersuchung des Partikelemissionsverhaltens von Scheibenbremsen unter transienten Lasten, 2019

Niemann, H. et al.: Application of a Sampling Enclosure for the Identification of the Influencing Parameters on Brake Wear Particle Emissions (2019)

Niemann, Hartmut; Winner, Hermann; Asbach, Christof; Kaminski, Heinz; Zessinger, Marco: Application of a Sampling Enclosure for the Identification of the Influencing Parameters on Brake Wear Particle Emissions, European Aerosol Conference 2019, Göteborg, 2019

Niemann, H. et al.: Influence of Disc Temperature on Ultrafine, Fine, and Coarse Particle Emissions of Passenger Car Disc Brakes with Organic and Inorganic Pad Binder Materials (2020)

Niemann, Hartmut; Winner, Hermann; Asbach, Christof; Kaminski, Heinz; Frentz, Georg; Milczarek, Roman: Influence of Disc Temperature on Ultrafine, Fine, and Coarse Particle Emissions of Passenger Car Disc Brakes with Organic and Inorganic Pad Binder Materials, in: Atmosphere (10), Jahrgang 11, S. 1060, 2020

Niemann, H. et al.: Map based simulation of brake wear particle emissions (2020)

Niemann, Hartmut; Winner, Hermann; Asbach, Christof; Kaminski, Heinz; Zessinger, Marco; Brandau, Michael: Map based simulation of brake wear particle emissions, in: EuroBrake, Jahrgang 2020, 2020

Niemann, H. et al.: Influence of pad retraction and air gap width between brake disc and pad on PM10 wear emissions during cruising conditions (2021)

Niemann, Hartmut; Kaminski, Heinz; Asbach, Christof; Blödel, Alexander; Winner, Hermann: Influence of pad retraction and air gap width between brake disc and pad on PM10 wear emissions during cruising conditions, in: EuroBrake, Jahrgang 2021, 2021

Nosko, O. et al.: Temperature effect on emission of airborne wear particles from car brakes (2015)

Nosko, Oleksii; Alemani, Mattia; Olofsson, Ulf: Temperature effect on emission of airborne wear particles from car brakes, in: , 2015

Nosko, O. et al.: Emission of 1.3–10 nm airborne particles from brake materials (2017)

Nosko, Oleksii; Vanhanen, Joonas; Olofsson, Ulf: Emission of 1.3–10 nm airborne particles from brake materials, in: *Aerosol Science and Technology* (1), Jahrgang 51, S. 91–96, 2017

Nosko, O.; Olofsson, U.: Quantification of ultrafine airborne particulate matter generated by the wear of car brake materials (2017)

Nosko, Oleksii; Olofsson, Ulf: Quantification of ultrafine airborne particulate matter generated by the wear of car brake materials, in: *Wear* 374–375, S. 92–96, 2017

Olofsson, U. et al.: Towards a model for the number of airborne particles generated from a sliding contact (2009)

Olofsson, Ulf; Olander, Lars; Jansson, Anders: Towards a model for the number of airborne particles generated from a sliding contact, in: *Wear* (12), Jahrgang 267, S. 2252–2256, 2009

Ostermeyer, G. P.; Müller, M.: Surface Topography and Wear Dynamics of Brake Pads

Ostermeyer, G. P.; Müller, M.: Surface Topography and Wear Dynamics of Brake Pads, in: *SAE Technical Paper Series*, Jahrgang 2006

Ostermeyer, G. P.; Müller, M.: New insights into the tribology of brake systems (2008)

Ostermeyer, G. P.; Müller, M.: New insights into the tribology of brake systems, in: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* (7), Jahrgang 222, S. 1167–1200, 2008

Ostermeyer, G. P.; Wilkening, L.: Experimental Investigations of the Topography Dynamics in Brake Pads (2013)

Ostermeyer, Georg P.; Wilkening, Lars: Experimental Investigations of the Topography Dynamics in Brake Pads, in: *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* (3), Jahrgang 6, S. 1398–1407, 2013

Ostermeyer, G.-P.; Kijanski, J.: Surface Reservoir Dynamics in Friction Interfaces (2019)

Ostermeyer, Georg-Peter; Kijanski, Jacek: Surface Reservoir Dynamics in Friction Interfaces, *EuroBrake 2019*, Dresden, 2019

Perricone, G. et al.: A concept for reducing PM 10 emissions for car brakes by 50% (2018)

Perricone, Guido; Matějka, Vlastimil; Alemani, Mattia; Valota, Giorgio; Bonfanti, Andrea; Ciotti, Alessandro; Olofsson, Ulf; Söderberg, Anders; Wahlström, Jens; Nosko, Oleksii; Straffellini, Giovanni; Gialanella, Stefano; Ibrahim, Metinoz: A concept for reducing PM 10 emissions for car brakes by 50%, in: *Wear* 396–397, S. 135–145, 2018

Popov, V.: Kontaktmechanik und Reibung (2016)

Popov, Valentin: Kontaktmechanik und Reibung, 3. Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016

Ricciardi, V. et al.: Artificial neural network regression models for the prediction of brake-related emissions

Ricciardi, Vincenzo; Schiele, Martin; Hesse, David; Hauschild, Peter; Augsburg, Klaus: Ricciardi, V. et al.: Artificial neural network regression models for the prediction of brake-related emissions, in: EuroBrake Proceedings 2020

S. Ramousse et al.: Thermal Characterisation of Brake Pads (2001)

S. Ramousse; J. W. Høj; O. T. Sørensen: Thermal Characterisation of Brake Pads, in: Journal of Thermal Analysis and Calorimetry Vol. 64, Jahrgang 2001, S. 933–943, 2001

Sachse, H.: Untersuchungen zu geeigneten Messmethoden und Prüfverfahren für die Bewertung bremseninduzierter Emissionen (2015)

Sachse, Hannes: Untersuchungen zu geeigneten Messmethoden und Prüfverfahren für die Bewertung bremseninduzierter Emissionen, in: Breuer, Bert (Hrsg.): XXXIV. Internationales [My]-Symposium Bremsen-Fachtagung, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik Nr. 794, VDI-Verl., Düsseldorf, 2015

Schramm, T.; Ostermeyer, G. P.: Automated Brake Pad Surface Topography Measurement using the AUT (2016)

Schramm, Tobias; Ostermeyer, G. P.: Automated Brake Pad Surface Topography Measurement using the AUT, in: FISITA (Hrsg.): EuroBrake 2016 Proceedings, Milano, 2016

Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1 (2009)

Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009

Tränkler, H.-R.; Reindl, L. M.: Sensortechnik (2014)

Tränkler, Hans-Rolf; Reindl, Leonhard M.: Sensortechnik, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014

UNECE Particle Measurement Program: Non-Exhaust Brake Emissions — Laboratory testing — Part 1: Inertia Dynamometer Protocol to Measure and Characterise Brake Emissions Using the WLTP-Brake Cycle

UNECE Particle Measurement Program: Non-Exhaust Brake Emissions — Laboratory testing — Part 1: Inertia Dynamometer Protocol to Measure and Characterise Brake Emissions Using the WLTP-Brake Cycle, in:

Wahlström, J. et al.: Simulation of Airborne Wear Particles from Disc Brakes (2009)

Wahlström, Jens; Olofsson, Ulf; Söderberg, Anders: Simulation of Airborne Wear Particles from Disc Brakes, in: , Jahrgang 2009, 2009

Wahlström, J. et al.: A Cellular Automaton Approach to Numerically Simulate the Contact Situation in Disc Brakes (2011)

Wahlström, J.; Söderberg, A.; Olofsson, U.: A Cellular Automaton Approach to Numerically Simulate the Contact Situation in Disc Brakes, in: Tribology Letters (3), Jahrgang 42, S. 253–262, 2011

Wahlström, J. et al.: Contact Pressure and Sliding Velocity Maps of the Friction, Wear and Emission from a Low-Metallic/Cast-Iron Disc Brake Contact Pair (2017)

Wahlström, J.; Matejka, V.; Lyu, Y.; Söderberg, A.: Contact Pressure and Sliding Velocity Maps of the Friction, Wear and Emission from a Low-Metallic/Cast-Iron Disc Brake Contact Pair, in: Tribology in Industry (4), Jahrgang 39, S. 460–470, 2017

Eigene Veröffentlichungen

- Viehof, M.; Niemann, H.; Kochem, M.; Winner, H.:** Objektivierungspotenzial der operativen Validierung im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation, In: VDI-Berichte 2279, 18. Kongress SIMVEC – Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung 2016, 22.-23. November, Baden-Baden, 2016, S. 417-438
- Viehof, M.; Niemann, H.; Kochem, M.; Winner, H.:** Validierungskonzept für vertikaldynamische Fahrzeugeigenschaften. In: VDI-Berichte 2296, 16. Internationale VDI-Tagung Reifen – Fahrwerk – Fahrbahn 2017, 25.-26. Oktober, Hannover, 2017, S. 147-174
- Niemann, H., Winner, H., Asbach, C., Kaminski, H., Zessinger, M. ,** System Identification Method for Brake Particle Emission Measurements of Passenger Car Disc Brakes on a Dynamometer, SAE Technical Paper 2018-01-1884, 2018, doi:10.4271/2018-01-1884.
- Niemann, H., Winner, H., Asbach, C., Kaminski, H., Zessinger, M.:** Untersuchung des Partikelemissionsverhaltens von Scheibenbremsen unter transienten Lasten, In: VDI-Berichte 2296, 16. Internationale VDI-Tagung Reifen – Fahrwerk – Fahrbahn 2019, 16.-17. Oktober, Hannover, 2019, S. 111-131
- Niemann, H., Winner, H., Asbach, C., Kaminski, H., Zessinger, M.:** Map based simulation of brake wear particle emissions, In: EuroBrake Proceedings 2020, Barcelona
- Niemann, H.; Winner, H.; Asbach, C.; Kaminski, H.; Frentz, G.; Milczarek, R.:** Influence of Disc Temperature on Ultrafine, Fine, and Coarse Particle Emissions of Passenger Car Disc Brakes with Organic and Inorganic Pad Binder Materials. In: Atmosphere, 11 (10), p. 1060. ISSN 2073-4433,
- Niemann, H.; Kaminski, H.; Asbach, C.; Frentz, G.; Blödel, A.; Winner, H.:** Influence of pad retraction and air gap width between brake disc and pad on PM10 wear emissions during cruising conditions, In: EuroBrake Proceedings 2021

Betreute studentische Arbeiten

Barwig, Manuel; Hoffmann, Marius; Laubach, Lorenz; Stähler, Christof: Entwicklung, Konstruktion und Inbetriebnahme einer modularen Plattform zur Integration von Fahrdynamikmesstechnik in variable Versuchsfahrzeuge. Advanced Design Project Nr. 109/18, 2018

Blödel, Alexander: Potentialanalyse eines “Gläsernen Schwungmassen-Prüfstandes” als Versuchswerkzeug zur Ableitung einer Wirkungskette von Partikelemissionen durch Pkw-Scheibenbremsen. Bachelor-Thesis Nr. 1308/17, 2017

Brandau, Michael: Entwicklung von partikelemissionsarmen Bremsstrategien im Hinblick auf automatisierte Fahrfunktionen und rekuperatives Bremsen. Master-Thesis Nr. 747/19, 2019

Guerra, Albert: Development and Assembly of a Sampling Device and a Dilution System for Brake Particle Measurements in Test Drives. Bachelor-Thesis Nr. 1314/18, 2018

Hartfiel, Regina: Potentialanalyse einer Messdienstleistung zur Parametrierung und Validierung eines Fahrdynamiksimulationsmodells. Master-Thesis Nr. 742/19, 2019

Ngo, Gia Thi; Sonnleitner, Alexander; Sternkopf, Felix; Vo, Dinh-Van; Vo, Kim-Khanh: Entwicklung eines Konzepts und Konstruktion einer Versuchseinrichtung zur zeitlich synchronisierten Generierung von Partikel-Testsignalen. Advanced Design Project Nr. 101/17, 2017

Scherschel, Alexander; Smith, Alexei; Wargel, Zachariah: Experimental Investigation of the Transient Transfer Function of Aerosol Measurement Devices. REU-Projekt Nr. 04/18, 2018

Shams, Omid: Literaturrecherche zum Stand der Technik auf dem Gebiet der Partikelmesstechnik. Studienarbeit Nr. 1300/17, 2017

Sommer, Tim: Modellierung des thermischen Verhaltens von Pkw-Scheibenbremsen für die Simulation von Bremspartikelemissionen. Bachelor-Thesis Nr. 1310/17, 2017

Stähler, Christof: Inbetriebnahme und Validierung von Messtechnik zur Bremspartikelemissionsmessung im Fahrversuch. Bachelor-Thesis Nr. 1309/17, 2017

Tichi, Benedikt: Entwicklung eines Konzepts für eine Messdienstleistung zur Parametrierung und Validierung von Fahrdynamik-Simulationsmodellen. Master-Thesis Nr. 669/17, 2017

Wang, Hao: Modellierung des makroskopischen Verschleißverhaltens von Pkw-Scheibenbremsen. Master-Thesis Nr. 671/17, 2017